

**В.И. ВЕТОХИН, И.М. ПАНОВ,
В.А. ШМОНИН, В.А. ЮЗБАШЕВ**

**ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ
КОМБИНИРОВАННЫЕ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ
МАШИНЫ**

ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ, РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ



**В.И. ВЕТОХИН, И.М. ПАНОВ,
В.А. ШМОНИН, В.А. ЮЗБАШЕВ**

**ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ
КОМБИНИРОВАННЫЕ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ
МАШИНЫ**

ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ, РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

МОНОГРАФИЯ

**КИЕВ
«ФЕНИКС»
2009**

УДК 631.31
ББК 40.72

Рекомендовано к печати

*Ученым советом Национального технического университета Украины
«Киевский политехнический институт» 03.03.2009 (протокол № 3)*

Рецензенты: **Гуков Я.С.** - Академик Украинской ААН,
Д-р техн. наук, профессор,
директор Национального научного центра «ИМЭСХ»;
Кушнарев А.С. - Член-корреспондент Украинской ААН,
Д-р техн. наук, профессор,
главный научный сотрудник УкрНИИПИТ им. Л. Погорелого

Тягово-приводные комбинированные почвообрабатывающие машины: Теория, расчет, результаты испытаний: монография / В.И. Ветохин, И.М. Панов, В.А. Шмонин, В.А. Юзбашев. - К.: Феникс, 2009. – 264 с.: илл. – (на русском языке)
ISBN 978-966-651-677-3

В монографии изложены теория, расчет и результаты испытаний тягово-приводных комбинированных почвообрабатывающих машин (ротационных плугов, почвообрабатывающих фрез и лемешных плугов с комбинированными рабочими органами). Приведен исторический обзор конструкций, теоретические основы динамики и силового анализа тягово-приводных комбинированных почвообрабатывающих машин. Проанализировано влияние различных факторов на энергоемкость и качество работы, изложены результаты экспериментальных исследований тягово-приводных комбинированных почвообрабатывающих машин. Приведены примеры реализации теоретических положений в конструкциях машин.

Книга предназначена для научных работников, студентов, аспирантов агроинженерных ВУЗов и специалистов сельхозмашиностроения.

УДК 631.31
ББК 40.72

ISBN 978-966-651-677-3

© Ветохин В.И., Панов И.М.,
Шмонин В.А., Юзбашев В.А., 2009

ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени остается актуальным высказывание основоположника земледельческой механики акад. В.П. Горячкина о том, что обработка почвы «является самой важной, самой продолжительной, самой дорогой и тяжелой работой». Принято считать, что на обработку почвы ежегодно расходуется почти 40% энергетических и 15% трудовых затрат в растениеводстве. Поэтому во все времена не прекращались поиски более эффективных технологий и более совершенных машин для обработки почвы.

Большинство почвообрабатывающих машин, применяемых в сельском хозяйстве, работают в тяговом режиме, получая необходимую энергию через прицепные устройства трактора. Принцип работы тяговых машин, унаследованный от орудий живой тяги, противоречит современным тенденциям развития тракторов, оснащаемых валами отбора мощности (ВОМ), которые позволяют непосредственно использовать мощность двигателя, минуя прицеп трактора. Почвообрабатывающие машины тяговой концепции имеют ряд существенных технологических и технических недостатков, в том числе: передача мощности через колесные или гусеничные движители, что ограничивает КПД машинно-тракторного агрегата (МТА) в пределах 0,5...0,7; большое тяговое сопротивление, что обуславливает значительную массу трактора для обеспечения необходимой силы тяги.

Для подготовки почвы под посадку или посев сельскохозяйственных культур тяговыми машинами необходимо провести несколько операций набором машин, состоящим как минимум из плуга, культиватора, различных борон и катков, что удлиняет и удорожает предпосевную обработку почвы. Многократные проходы мощных и

тяжелых МТА по полю неблагоприятно отражаются на агрофизическом состоянии почвы: разрушается структура верхних слоев и уплотняются нижние горизонты, что ведет к развитию ветровой и водной эрозии, снижению потенциального плодородия полей и недобору урожая.

На данном этапе развития земледельческой механики одним из перспективных направлений развития почвообрабатывающей техники является применение машин с активными рабочими органами, приводимыми во вращение от вала отбора мощности трактора (ВОМ) или другого автономного двигателя. Академик В.П. Горячкин, рассматривая перспективы развития плугов, считал, что «как пропеллер бороздит воздух, так и отвал плуга – почву, поэтому в будущем наиболее перспективным является фрезер». Почвообрабатывающие машины с приводными рабочими органами (почвообрабатывающие фрезы, ротационные плуги) обладают рядом технологических преимуществ по сравнению с традиционными лемешно-отвальными плугами, культиваторами, боронами и т.п. традиционными машинами: они могут использоваться в широком диапазоне состояния почвы – от пересушенных до переувлажненных и даже залитых водой рисовых чеков.

Ротационная обработка почвы обеспечивает высокую агрономическую эффективность обработанного слоя. Приводные рабочие органы могут в широком диапазоне изменять качество обработки почвы, благодаря селективному сочетанию частоты вращения рабочих органов и поступательной скорости машины. В зависимости от кинематического режима, (т.е. соотношения поступательной и окружной скоростей) они могут выполнять основную и предпосевную обработку почвы. Другими словами имеется большие возможности по управлению структурой почвы, а необходимая структура почвы обеспечивает ее обменные характеристики и соответственно более высокий урожай.

Большую часть необходимой энергии они получают через ВОМ трактора и имеют невысокое тяговое сопротивление. Это позволяет более эффективно использовать мощность двигателя трактора, повысить КПД и работать с энергонасыщенными тракторами меньшей массы.

Однако приводные почвообрабатывающие машины более сложны по устройству, менее надежны в работе, более энергоемки, менее производительны и характеризуются высокой степенью неравномерности нагрузки.

Из всех способов снижения энергоемкости приводных почвообрабатывающих машин наиболее эффективным оказался способ изменения состояния почвы путем ее предварительного рыхления или доведения почвы до переувлажненного состояния, как это делается в залитых водой рисовых чеках. Изменение монолитного состояния почвы можно достичь путем комбинации работы тяговых и приводных рабочих органов. В этом случае необходимая для обработки почвы мощность поступает через два канала: прицеп трактора и ВОМ.

Тягово-приводная концепция обработки почвы имеет ряд преимуществ как по сравнению с традиционными тяговыми машинами, так и чисто приводными. Тягово-приводные орудия имеют более высокий, приведенный к степени крошения почвы, КПД, а также возможность качественного перехода от орудий для разуплотнения почвы к орудиям по управлению состоянием структуры почвы.

В предлагаемой монографии обобщены результаты разработок отечественных и зарубежных ученых по созданию и исследованию почвообрабатывающих машин с тягово-приводными рабочими органами: комбинированных отвально-лемешных плугов, а также комбинированных фрез и ротационных плугов, приведены результаты собственных разработок, а также разработок наших сотрудников.

Глава 1. Краткий обзор конструкций комбинированных почвообрабатывающих машин

1.1. Комбинированные лемешно-отвальные плуги

Применяемые для основной обработки почвы лемешно-отвальные плуги, чизельные плуги и плуги-рыхлители имеют ряд серьезных недостатков, наиболее существенные из которых – необходимость дополнительной обработки пашни для приведения ее в состояние, пригодное для посева или посадки сельскохозяйственных культур, а также большое тяговое сопротивление, требующее для работы тракторов большой массы с соответствующим тяговым усилием. Поэтому для повышения крошения почвы, выравнивания поля и снижения тягового сопротивления плуги и рыхлители комбинируют с различными дополнительными устройствами, в основном вращательного действия, без привода или с принудительным приводом от ВОМ трактора или другого двигателя. В табл. 1.1 представлены схемы некоторых подобных комбинаций с лемешно-отвальными плугами [58].

Одной из первых моделей плугов в комбинации с бесприводным лопастным диском были плуги марки «Турбиятор». Лопастной диск устанавливался сзади отвала плуга поперек движения пласта. Некоторое дополнительное крошение пласта достигалось лопастями диска. Частота вращения диска была небольшой и зависела от поступательной скорости плуга, поэтому дополнительное крошение почвы было незначительным [35].

Итальянская фирма “Pedron” на некоторых плугах устанавливала вместо крыла отвала сферические диски большого диаметра (рис. 1.1).

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

Таблица 1.1

Схемы комбинированных лемешно-отвальных плугов с устройствами для дополнительного крошения и выравнивания пашни





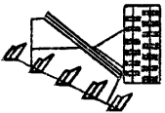


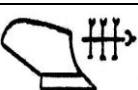

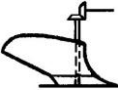


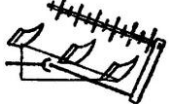


| Схема плуга | Наименование, фирма, страна | Глубина обработки, см | | Число оборотов дополнительного рабочего органа, об/мин | Поступательная скорость, км/ч |
|---|-------------------------------|-----------------------|---------------------------------|--|-------------------------------|
| | | корпуса | Дополнительного рабочего органа | | |
|  | «Турбиятор», США | 25 | - | - | 3-5 |
|  | Плуг Сабо, Венгрия | 27 | - | - | 5-7 |
|  | Плуг фирмы «Redron», Италия | 20-30 | - | - | 5-7 |
|  | Плуг фирмы «КМФ», Австрия | 27 | 5-8 | - | 5-7 |
|  | ПКА-2, «Алтайсельмаш», Россия | 27 | 5-8 | - | 4-6 |
|  | Пластодробитель, США | 27 | 27 | 300 | 3-5 |
|  | Плуг по патенту США | - | - | - | - |
|  | Плуг фирмы «Фергюсон», Канада | 27 | 8-10 | 250 | 5-7 |

Таблица 1.1. Продолжение

| | | | | | |
|---|---|----|-------|-----|----------|
|  | Плуг РС-4А, Польша | 27 | 37 | 180 | 5-6 |
|  | Плуг по патенту США | - | - | - | - |
|  | Плуг по патенту США | - | - | - | - |
|  | Плуг фирмы «Омсель», Италия | 40 | 10-12 | 170 | 3-5 |
|  | Плуг фирмы “Overum”, Швеция | 25 | 6-7 | - | 5-7 |
|  | Плуг Чивелло, Италия | - | 30-35 | 210 | 1-4 |
|  | Плуг «Комбинус» фирмы «Раусендорф», Германия | 27 | 27 | 220 | 5- 10 |
|  | Плуг PF-3-35, Польша | 27 | 27 | 220 | 5-7 |

Под действием напора пласта диск вращается и растягивает пласт, обеспечивая дополнительное крошение. При этом также улучшается оборот пласта и обеспечивается укладка его в борозду [35]. Кроме того, достигается некоторое снижение тягового сопротивления, благодаря снижению трения пласта по вращающемуся диску.

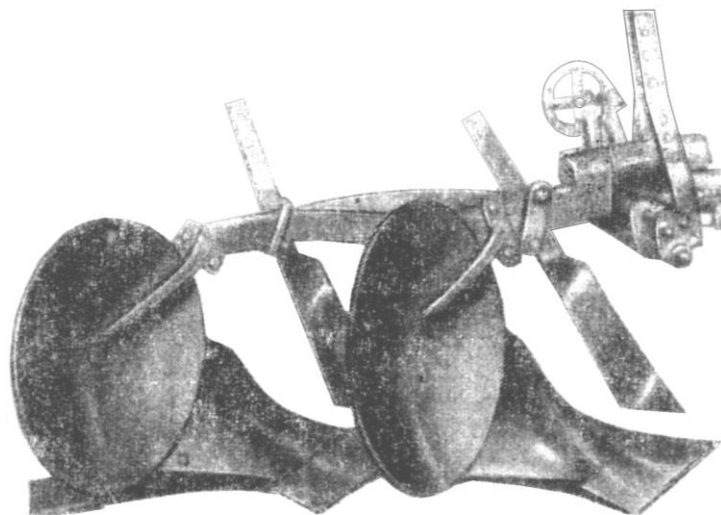


Рис. 1.1. Плуг фирмы “Pedron” с дисковыми отвалами

Примером плуга, у которого крылья отвалов заменены неприводными вращающимися рабочими органами, является плуг венгерского изобретателя Сабо. В этом плуге вместо крыльев отвалов установлены обрезиненные ролики в форме усеченного конуса, поверхность которого представляет собой параболоид вращения (рис. 1.2).

Испытания плуга показали, что он лучше крошит почву, чем серийный плуг (на 1,5...9%), вследствие чего поверхность пашни получается менее гребнистой и глыбистой. Однако по степени и глубине заделки растительных остатков плуг Сабо уступал серийным плугам. При динамометрировании оказалось, что экспериментальный плуг обеспечивал снижение удельного тягового сопротивления на 8,2...17,3%. Однако большая часть снижения сопротивления (49,5...60,8%) достигалась благодаря установке на последнем корпусе обрезиненного катка, заменяющего полевые доски [84].

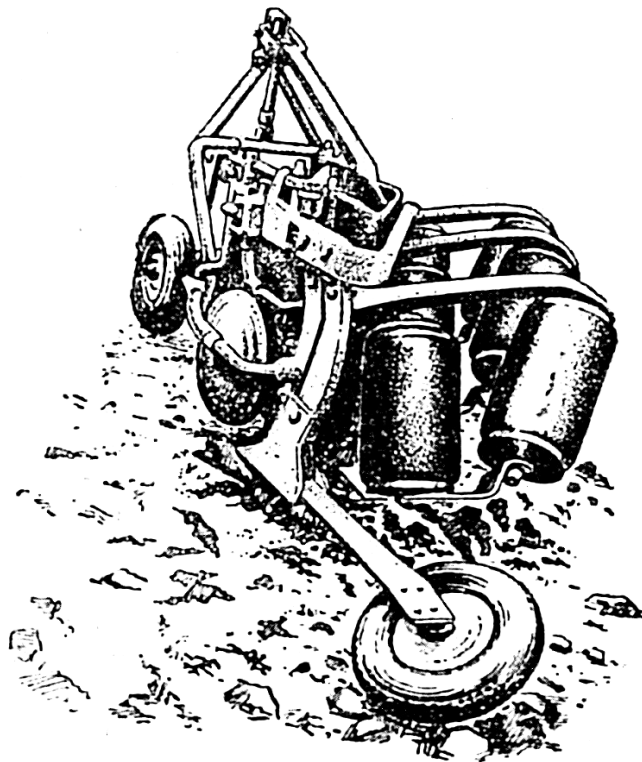


Рис. 1.2. Плуг с роликовыми отвалами

В прошлом веке во многих странах широкое распространение получили плуги в комбинации с различного рода катками: звездчатыми, кольчато-шпоровыми, спиральными и др. На рис. 1.3 показан плуг завода «Алтайсельмаш» с приспособлением ПКА-2, состоящем из уголкового волокуши и двухрядного звездчатого катка.

Поле, обработанное таким комбинированным агрегатом, имеет более выровненную поверхность, а верхний слой достаточно рыхлый и подготовлен под посев на легких и средних почвах. На сухих и твердых почвах эффективность ПКА-2 значительно снижается. [83].

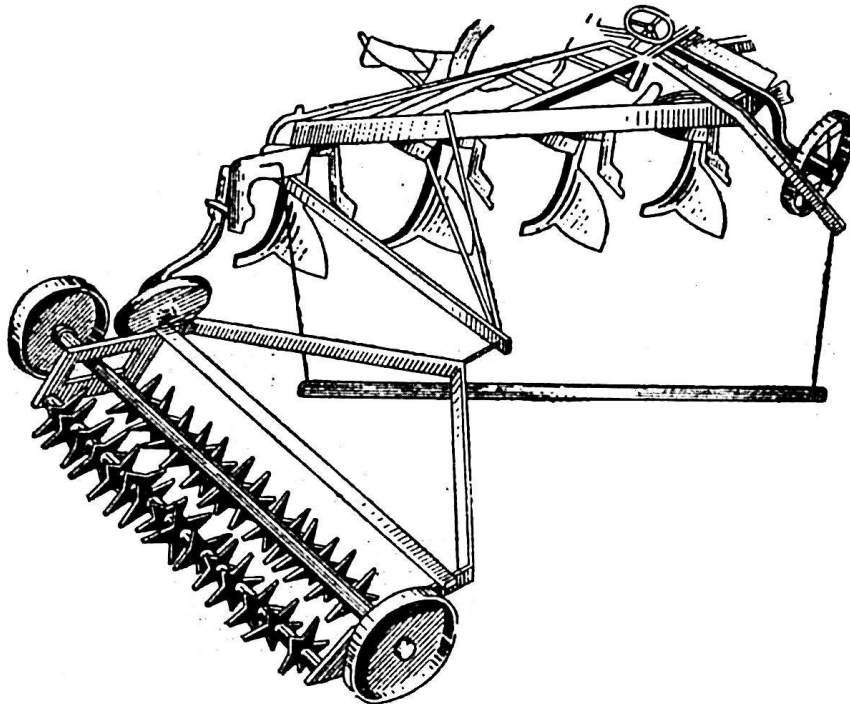


Рис. 1.3. Плуг с приспособлением для дополнительной обработки почвы ПКА-2

Приспособления к плугам с неприводными рабочими органами все же не давали должного эффекта ни по крошению, ни по выравниванию пашни, ни по снижению тягового сопротивления. Поэтому наибольшее применение получили приспособления с приводом от ВОМ трактора.

В 1925 г. фирмой «Форд» (США) было начато производство плугов с пластодробителем [35]. Пластодробитель представлял собой вертикальный ротор с несколькими рядами изогнутых ножей, установленный перед плужным корпусом. Ротор приводился во вращение от ВОМ трактора через карданную передачу и редуктор. Другая фирма

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

«М. Гаррис» (США) выпускала подобные плуги под названием «Пульвератор», в которых приводной ротор располагался вдоль образующих отвальной поверхности плужного корпуса. Такие плуги допускали пахоту на более высоких скоростях, чем обычные, но потребляли мощность больше на 10...15%.

Фирма «Фергюсон» (Канада) устанавливала роторы с горизонтальной осью вращения вместо предплужников, перед основными корпусами плуга. Ротор состоял из трех Г-образных ножей, закрытых кожухом. Фирма рекомендовала применять такие плуги на сильно заросших полях. Фрезерные предплужники измельчали и сбрасывали задернелый слой на дно борозды предыдущего прохода, обеспечивая хорошую заделку растительных и пожнивных остатков [99].

Итальянская фирма «Омсель» на кустарниково-болотных плугах сзади корпусов размещала секции фрезы, которые при вспашке вновь осваиваемых земель производили измельчение пластов. Для того чтобы растительные остатки не выворачивались на поверхность, фрезерование производилось на небольшую глубину. Из-за этого большая часть пахотного слоя оставалась не измельченной, что является недостатком данной конструкции [100].

Шведская фирма «Оверум» выпускала трехкорпусные плуги в комбинации с приводным ротором, расположенным сзади и вдоль корпусов. Ротор измельчал и выравнивал верхний слой почвы. После прохода такого плуга даже на плотных почвах количество дополнительных операций по подготовке почвы к посеву сокращалось в два раза. Мощность для привода ротора составляла 7,36 кВт. Масса ротора не превышала 160 кг. Благодаря расположению ротора под углом к направлению движения разгружались полевые доски плуга, и снижалось его тяговое сопротивление.

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

Совмещение пахоты с дополнительной предпосевной обработкой почвы эффективно осуществлено в плугах японской фирмы «Такакита» (рис. 1.4).

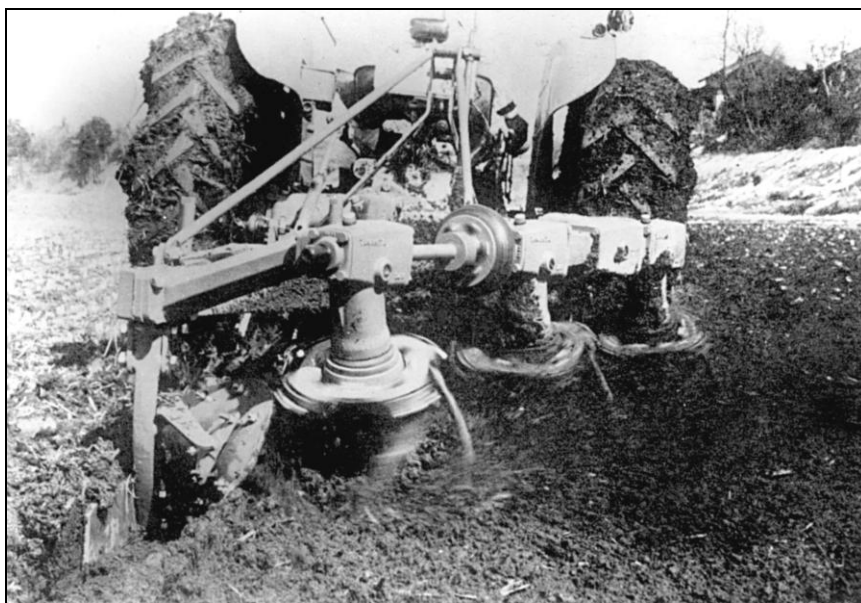


Рис. 1.4. Комбинированный плуг фирмы «Такакита»

Вертикальные роторы устанавливаются с правой стороны каждого корпуса. Вал ротора имеет небольшой наклон вперед и приводится во вращение от ВОМ трактора через карданную передачу и общий вал, идущий вдоль рамы. От вала через конические редукторы вращение передается на роторы. На каждом фланце ротора закреплено по четыре изогнутые по спирали ножа. Ножи ротора имеют частоту вращения $540...576 \text{ мин}^{-1}$.

Фирма «Такакита» выпускала навесные плуги в 2-х, 3-х и 4-х корпусной модификации (табл. 1.2).

Краткая техническая характеристика комбинированных плугов фирмы «Такакита»

| Модель плуга | N 392 | N 393 | N 394 |
|-----------------------------|-----------|----------|----------|
| Число корпусов | 2 | 3 | 4 |
| Ширина захвата корпуса, м | 0,3 | | |
| Ширина захвата плуга, м | 0,6 | 0,9 | 1,2 |
| Масса плуга, кг | 420 | 510 | 585 |
| Глубина рыхления ротором, м | 0,06-0,12 | | |
| Глубина пахоты, м | 0,14-0,22 | | |
| Ширина боронования, м | 0,6-0,63 | 0,9-0,93 | 1,2-1,23 |
| Рабочая скорость, м/с | 1,0-1,4 | | |

Фрезерные секции применялись в некоторых плугах не только как предплужники, но и как почвоуглубители. В качестве примера на рис. 1.5 приведена схема однокорпусного плуга с фрезерным почвоуглубителем.

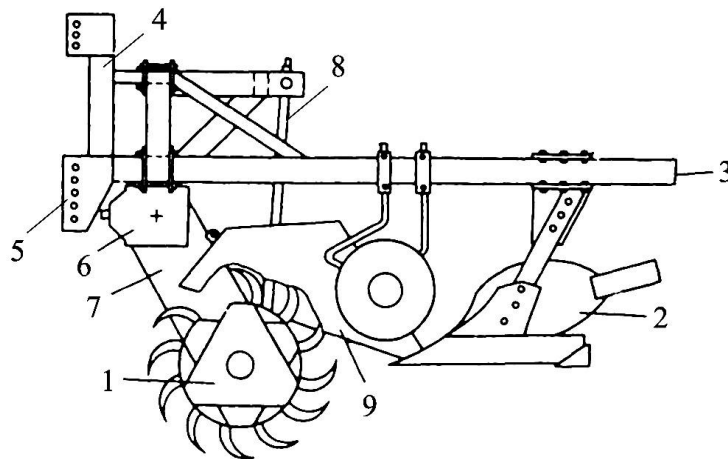


Рис. 1.5. Схема плуга с приводным ротационным почвоуглубителем:
 1 – ротационный почвоуглубитель; 2 – плужной корпус; 3 – рама плуга;
 4 – кронштейн; 5 – навеска; 6 – редуктор; 7 – цепная передача;
 8 – рычаг установки глубины; 9 – кожух

Фрезерный почвоуглубитель установлен перед плужным корпусом и производит рыхление на глубину 0,25 м ниже дна борозды. Разрыхленная почва закрывается пластом почвы, обернутым плужным корпусом. Общая глубина обработки достигает 0,5 м. Фрезерование приводит к увеличению корнеобитаемого слоя и накопления влаги в почве [94, 101].

Аналогичные плуги с фрезерными почвоуглубителями были испытаны в Польше. Фрезерная секция состояла из двух дисков с шестью Г-образными ножами на каждом. Диаметр фрезерной секции был равен 0,45 м. При расстоянии между дисками 0,2 м общая ширина захвата почвоуглубителя составляла 0,7 м. В отчете об испытаниях плуга с фрезерными почвоуглубителями отмечается, что плуг имел меньшее тяговое сопротивление по сравнению с плугом с пассивными почвоуглубителями. С агрономической точки зрения такая обработка почвы повышала урожайность сельскохозяйственных культур, благодаря улучшению водно-воздушного и пищевого режимов [95].

В 50-х годах прошлого века известность приобрел плуг итальянского изобретателя Чивелло (Патент Великобритании №742528, 1958 г.). Плуг представляет собой комбинацию плужного корпуса и вертикального ротора (рис. 1.6). Привод ротора производится от ВОМ трактора через карданную и цепную передачи. Боковые нагрузки воспринимаются сферическим диском, установленным сзади ротора. Плуги выпускались в одно- и двухкорпусном вариантах. Однокорпусный плуг имел ширину захвата 0,4 м, массу 240 кг, частоту вращения ротора 210 мин⁻¹. При рабочей скорости 0,3...1,4 м/с необходимая мощность трактора составляла 14,7...25,8 кВт. Испытания плуга Чивелло [102] показали, что по степени крошения почвы он занимает среднее положение между отвальным плугом и фрезой. На суглинистых почвах плуг

недостаточно оборачивал пласт и неудовлетворительно заделывал растительные остатки. Из-за плохой очистки борозды при последующем проходе колеса трактора уплотняли осыпавшуюся часть почвы.

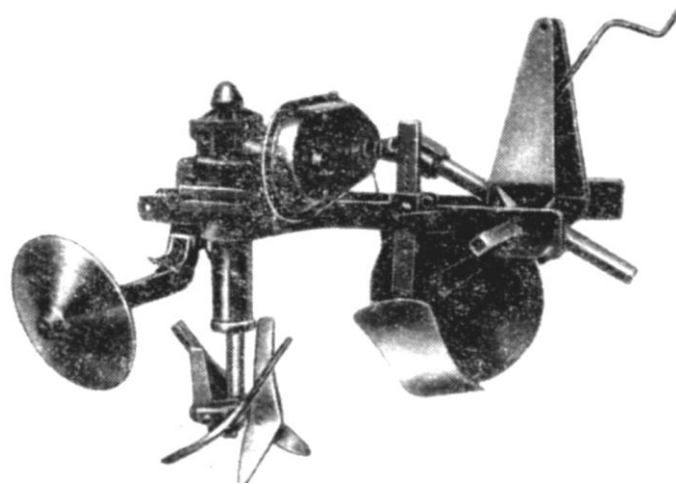


Рис. 1.6. Плуг Чивелло

При увеличении рабочей скорости до 0,34 м/с борозда очищалась лучше, но от стенки борозды отламываются крупные куски, которые отбрасывались ротором в сторону без измельчения. Тяговое сопротивление плуга Чивелло составляло 35-50% от тяги обычного плуга, однако общая мощность на супесчаной почве при скорости 0,33 м/с в 1,6 раза больше, чем у лемешно-отвального плуга. На глинистой почве при скорости 0,22 м/с потребная мощность для плуга Чивелло и фрезы такого же захвата примерно одинаковы и почти в 3 раза больше, чем у лемешно-отвального плуга. Однако при этом глубина обработки фрезой составляла 0,13 м, а обоими типами плугов 0,25 м.

По сравнению с фрезой плуг Чивелло имеет некоторые преимущества: если фреза с горизонтальной осью вращения начинает

отрезать пласт максимальной толщины и только в конце резания сводит ее к нулю, то вертикальный ротор плуга Чивелло начинает резать пласт с минимального сечения, постепенно увеличивая его и к концу резания снова сводя его к нулю, т.е. резание почвы происходит более плавно, без периодических пиков крутящего момента на валу ротора. Рабочие органы ротора плуга Чивелло при повороте на 180° совершают полезную работу. Однако, из-за недостаточного отбрасывания стружек, ножи ротора при обратном вращении снова врезаются в уже отрезанные стружки, дополнительно измельчая их.

Определенный интерес представляет комбинированный плуг конструкции Национального института сельскохозяйственной механики NJAE (Великобритания). На укороченном плужном корпусе вместо отвала установлен винтовой шнек, который оборачивает пласт, дополнительно его крошит и выравнивает гребни (рис. 1.7).

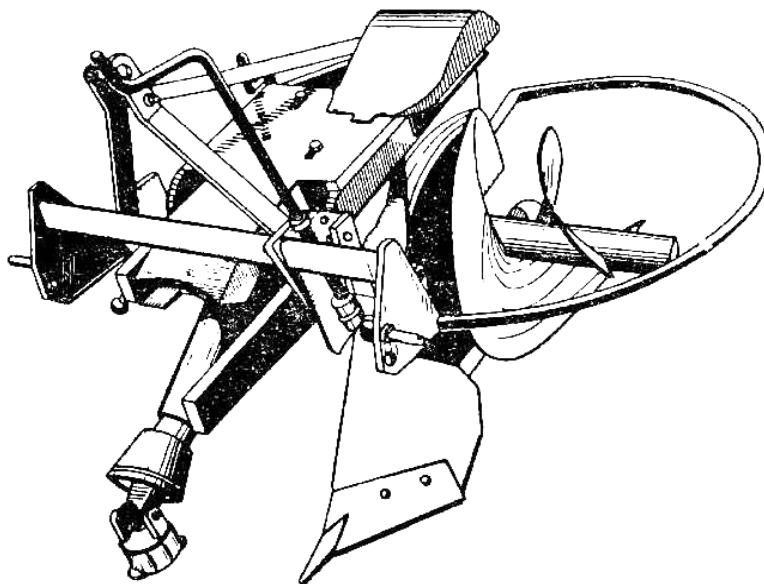


Рис. 1.7. Комбинированный плуг конструкции NJAE

По данным Д. Тома [80] такой плуг требует одинаковой мощности с лемешно-отвальным плугом равной ширины захвата, однако более трети общей мощности потребляет через ВОМ трактора и поэтому имеет меньшие потери на буксование.

Широкую известность в 60-х годах прошлого века получил комбинированный плуг «Комбинус» фирмы “Raussendorf” (Германия) (рис. 1.8).

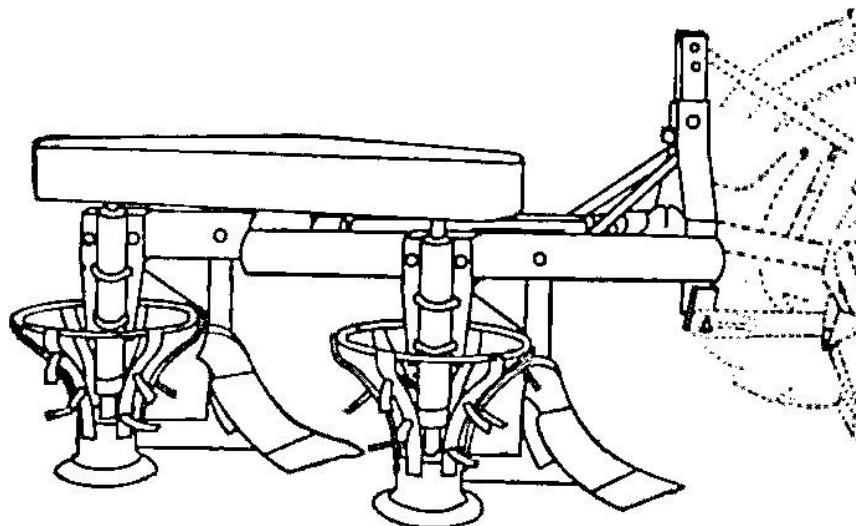


Рис. 1.8. Комбинированный плуг «Комбинус»

Плуги «Комбинус» выпускались в 2-х и 3-х корпусной модификациях (табл. 1.3). Рабочие органы плуга представляют собой комбинацию укороченного на одну треть плужного корпуса и приводного ротора, форма которого дополняет отрезанную часть отвала. Назначение ротора состоит в том, чтобы разрыхлить и уложить в борозду пласт почвы, поднятый укороченным корпусом. Укороченный лемех подрезает пласт лишь на две трети ширины, остальная часть пласта подрезается

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

тарельчатым диском, закрепленным на нижнем конце вала ротора. В зависимости от типа почвы (старопахотная почва или травяной пласт) на роторе устанавливаются прямые рыхлительные зубья или ножевидные лопатки. Ротор приводится во вращение от ВОМ трактора через редуктор и клиноременную передачу, которая одновременно может служить предохранителем при перегрузке ротора.

Таблица 1.3

Краткая техническая характеристика плугов «Комбинус»

| Показатели | Число корпусов | | |
|--|----------------|------|------|
| | 2 | 2 | 3 |
| Ширина захвата, м | 0,5 | 0,6 | 0,9 |
| Глубина обработки, м | 0,15-0,30 | | |
| Масса, кг | 370 | 380 | 600 |
| Ширина захвата корпуса, м | 0,25 | 0,30 | 0,30 |
| Ширина лемеха, м | 0,15 | 0,15 | 0,20 |
| Диаметр дискового тарельчатого ножа, м | 0,26 | | |
| Необходимая мощность трактора, кВт | 22 | 29 | 37 |
| Частота вращения ротора, мин ⁻¹ | 216 | | |
| Мощность, передаваемая через ВОМ, кВт | 3,0 | 4,4 | 6,0 |
| Окружная скорость ротора, м/с: | | | |
| - вверху | 4,1 | | |
| - внизу | 4,2 | | |

Плуг «Комбинус» испытывался в Институте земледелия Германии (Брауншвейг-Фолькенроде) [103]. Испытания показали, что он имеет ряд особенностей по сравнению с обычным лемешно-отвальным плугом:

- 1) поле после обработки комбинированным плугом не требует дополнительной обработки перед посевом, однако на тяжелых почвах в пахотном слое остаются крупные не разрушенные комки;
- 2) легкие суглинистые почвы после комбинированного плуга к весне сильно уплотняются;

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

- 3) на полях с супесчаной лёссовой почвой и рыхлой суглинистой почвой плотность и влажность весной были выше, чем на полях, обработанных обычным плугом; глинистая почва, обработанная плугом «Комбинус», наоборот, к весне была более рыхлой;
- 4) комбинированный плуг целесообразно использовать на зяблевой пахоте тяжелых почв, но он не пригоден для вспашки рыхлого суглинка;
- 5) комбинированный плуг значительно лучше перемешивает слои почвы, а также минеральные удобрения, навоз и известь с почвой;
- 6) тяговое сопротивление комбинированного плуга на 30% ниже, однако, общая потребная мощность на 13...26% выше, чем для обычного плуга;
- 7) на тяжелых почвах комбинированный плуг давал значительное повышение урожая зерновых культур и сахарной свеклы; на легких суглинистых почвах урожай озимых культур снижался, а яровых – повышался.

Подобные комбинированные плуги под маркой ПФ-3-35 выпускались в Польше. В отличие от немецких плужные корпуса плугов ПФ-3-35 имели нормальную ширину захвата, были укорочены лишь крылья отвалов. Если ротор плуга «Комбинус» производит крошение и оборот пласта, то ротор польского плуга выполняет крошение почти полностью перевернутого пласта и на всю глубину вспашки [93].

В 1965 г. в ВИСХОМ была разработана техническая документация аналога двухкорпусного плуга «Комбинус» под маркой ПВО-2-30 (плуг с вращающимися отвалами). Была изготовлена и испытана на ряде МИС партия таких плугов (рис. 1.9, 1.10) с целью определения экономической эффективности в различных почвенно-климатических зонах.

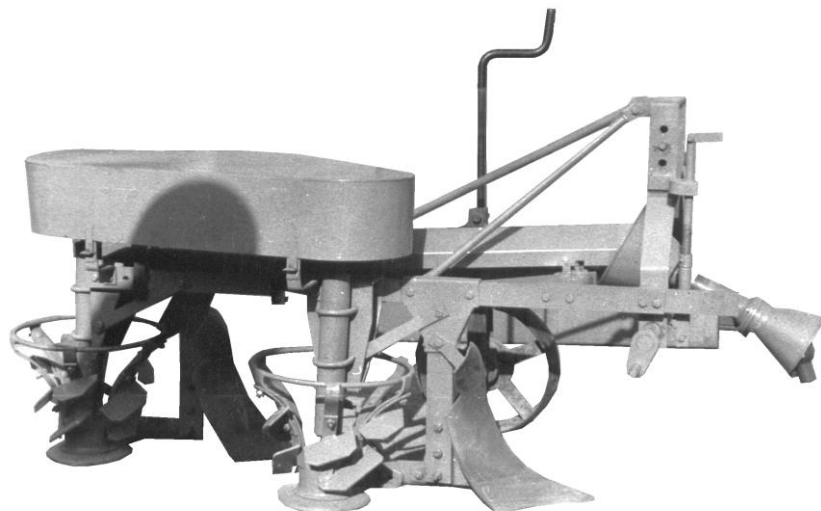


Рис. 1.9. Плуг с вращающимися отвалами ПВО-2-30

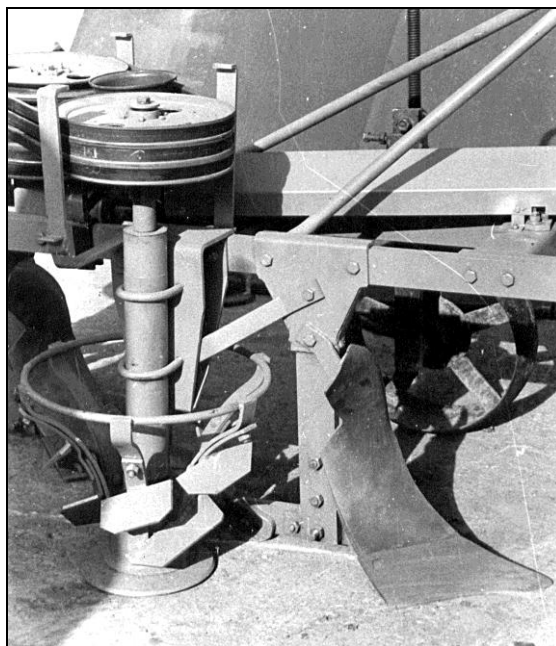


Рис. 1.10. Корпус и ротор с лопатками плуга ПВО-2-30

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

Краткая техническая характеристика плуга ПВО-2-30 приведена в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Краткая техническая характеристика плуга ПВО-2-30

| | |
|---|-------|
| Ширина захвата плуга, м | 0,6 |
| Максимальная глубина вспашки, м | 0,30 |
| Расстояние между корпусами по ходу, м | 0,95 |
| Высота рамы от опорной плоскости лемехов, м | 0,605 |
| Рабочая скорость, м/с | 1,94 |
| Масса плуга, кг | 480 |
| Масса ротора, кг | 50 |
| Передаточное число редуктора | 1:2,5 |
| Диаметр шкивов клиноременной передачи, м | 0,316 |
| Частота вращения ротора, мин ⁻¹ | 224 |
| Агрегатирование с трактором | T-40 |

Были проведены сравнительные испытания серийного лемешно-отвального плуга ПН-2-35, оригинала плуга «Комбинус» и плуга ПВО-2-30. Испытания проводили на клеверище второго года пользования. Целью сравнительных испытаний было определение баланса мощности указанных плугов с трактором МТЗ-80. Средняя влажность почвы учетного участка была 12,9%, плотность 2,16 МПа.

Испытания дали следующие результаты. Тяговое сопротивление плугов с вращающимися отвалами на 16-18% меньше, чем у серийного плуга, благодаря этому поступательная скорость МТА с комбинированными плугами была выше. Плуг ПВО-2-30 имел удельное сопротивление на 5,5% меньше, чем серийный ПН-2-35. Удельная мощность, приведенная к ведущим колесам трактора (с учетом потерь на самопередвижение) отнесенная к единице поперечного сечения пласта у плуга ПВО-2-30 в 1,54, а у плуга «Комбинус» в 1,69 раза больше, чем у плуга ПН-2-35. Это можно объяснить тем, что оба комбинированных плуга

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

имели лучшую степень крошения пласта, на что расходовалась дополнительная мощность.

По результатам испытаний на МИС, а также в Научно-исследовательском агрофизическом институте (АФИ) и в НИИСХ Юго-Востока (г. Саратов) была установлена агрономическая эффективность комбинированных плугов в различных почвенно-климатических зонах и определено их место в системе основной обработки почвы. По результатам испытаний ВИСХОМ совместно с ГСКБ по почвообрабатывающим машинам (г. Одесса) разработали несколько модификаций комбинированных плугов (табл. 1.5).

Таблица 1.5

Краткая характеристика комбинированных плугов разработки ВИСХОМ и ГСКБ по почвообрабатывающим машинам (г. Одесса)

| Показатели | Марка плуга | | |
|--|-------------|----------|----------|
| | ПВН-3-35 | ПОД-4-40 | ПОД-5-35 |
| Ширина захвата плуга, м | 1,05 | 1,60 | 1,75 |
| Глубина обработки, м | 0,30 | 0,30 | 0,35 |
| Ширина захвата корпуса, м | 0,35 | 0,40 | 0,35 |
| Диаметр тарельчатого ножа, м | 0,27 | - | 0,27 |
| Частота вращения ротора, мин ⁻¹ | 270 | 320 | 220 |
| Рабочая скорость, м/с | 1,4-2,5 | 1,4-2,5 | 1,4-2,5 |
| Агрегатируется с трактором кл. | 1,4 | 3-4 | 3-4 |

Навесной трехкорпусный плуг ПВН-3-35 (рис. 1.11) прошел государственные испытания, заводом «Одессапочвомаш» была выпущена промышленная серия этих плугов. Плуг ПОД-5-35 (рис. 1.12) прошел широкие полевые испытания с определением агротехнических и энергетических показателей. В дальнейшем он был переоборудован в 4-х корпусный вариант ПОД-4-40, который отличался отсутствием на роторе тарельчатого диска: его заменял лемех шириной 0,4 м.



Рис. 1.11. Комбинированный плуг ПВН-3-35

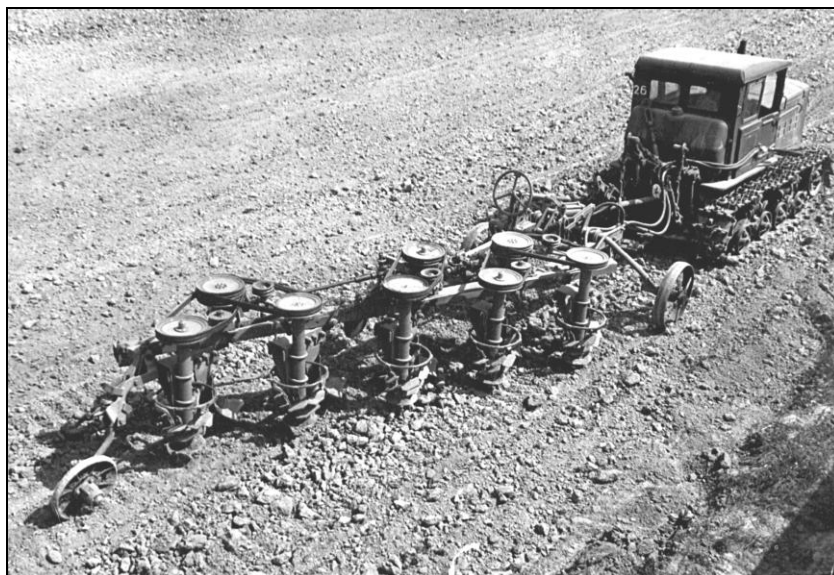


Рис. 1.12. Комбинированный плуг ПОД-5-35

В ЧИМЭСХ [28, 63] были разработаны несколько вариантов комбинированных плугов с рабочими органами, состоящими из укороченного плужного корпуса и ротора с наклонными ножами и нескольких витков спиралевидных лопаток (рис. 1.13).

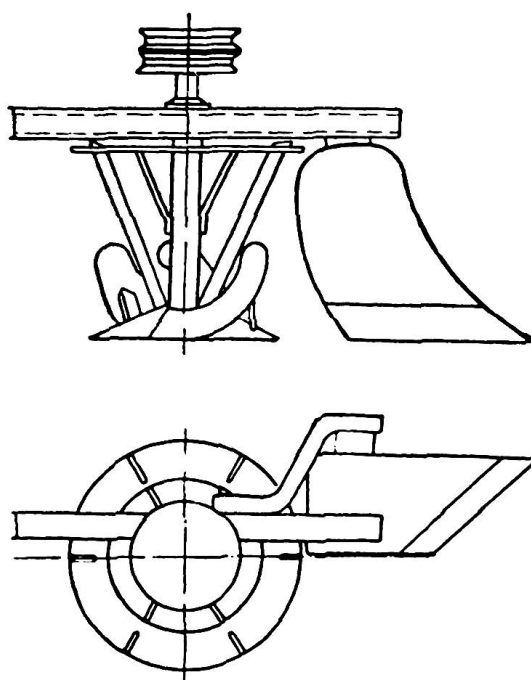


Рис. 1.13. Корпус комбинированного плуга конструкции ЧИМЭСХ

В целом ротор представляет собой конус с углом наклона образующих к вертикали 23° . При выборе параметров корпуса обеспечивалось перемешивание почвенных горизонтов во время полета почвы с рабочих поверхностей ротора в борозду. Оказалось, что наиболее эффективным способом смешивания и вертикального перемещения почвенных горизонтов является опережение сброса в борозду верхних частиц по сравнению с нижними частицами. При этом необходим

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

предварительный подъем пласта на некоторую высоту для облегчения последующего его оборота, а также сообщение верхним частицам пласта положительных вертикальных скоростей, а нижним – отрицательных.

Испытания показали, что каждой поступательной скорости движения плуга для достижения максимальной степени крошения почвы соответствует определенная частота вращения ротора n_p . Так, при скорости 1,3 м/с наибольший коэффициент крошения достигался при $n_p = 280 \text{ мин}^{-1}$ [62].

На основании этих работ ЗАО «Артком» (г. Челябинск) выпустил две модификации плугов (табл. 1.6).

Таблица 1.6

Техническая характеристика комбинированных плугов

| Параметры плуга и показатели работы | Марка плуга | |
|--|-------------|-------------|
| | ПЛР-2 | ПЛР-3 |
| Количество корпусов, шт. | 2 | 3 |
| Ширина захвата плуга, м | 0,7 | 1,05 |
| Глубина пахоты, м | 0,27 | |
| Рабочая скорость, м/с | до 2,5 | |
| Производительность, га/ч, чистой работы при скорости 1,4...2,5 м/с | 0,35...0,63 | 0,41...0,72 |
| Частота вращения ротора, мин^{-1} | 260...350 | |
| Агрегатируется с тракторами класса | 0,9-1,4 | 1,4 |

Аналогичные плуги разработаны в ВИМ (рис. 1.14, 1,15). Ротор комбинированного плуга выполнен в виде изогнутых ножей по форме отрезанной части отвала. Плуг имеет четыре корпуса общей шириной захвата 1,6 м и при глубине вспашки 0,25 м агрегатируется с трактором класса 3 (Т-150, Т-150К).

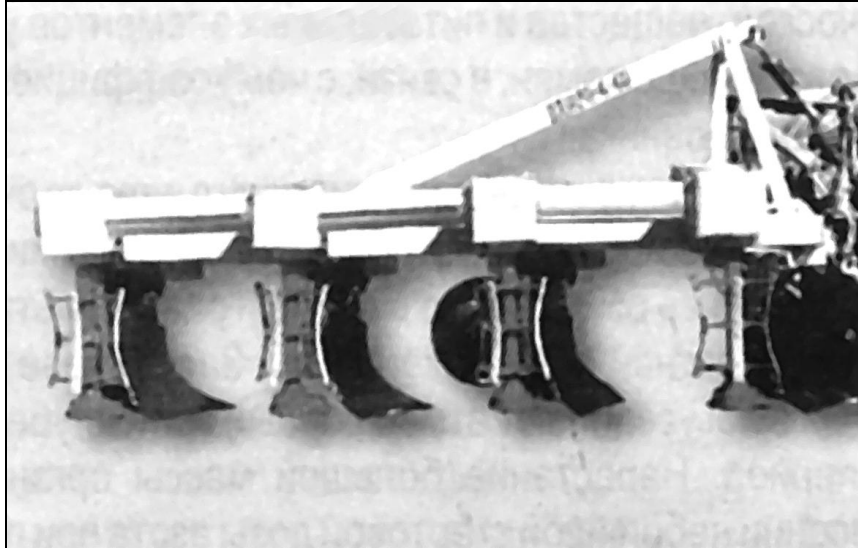


Рис. 1.14. Плуг лемешный навесной с роторным отвалом ПЛНРО-4-40

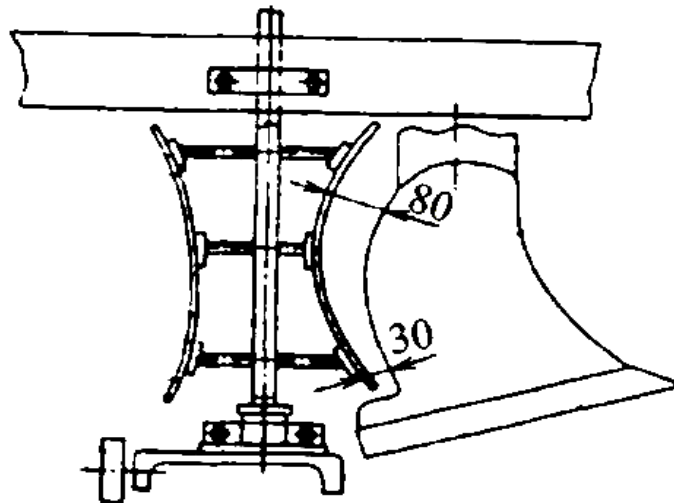


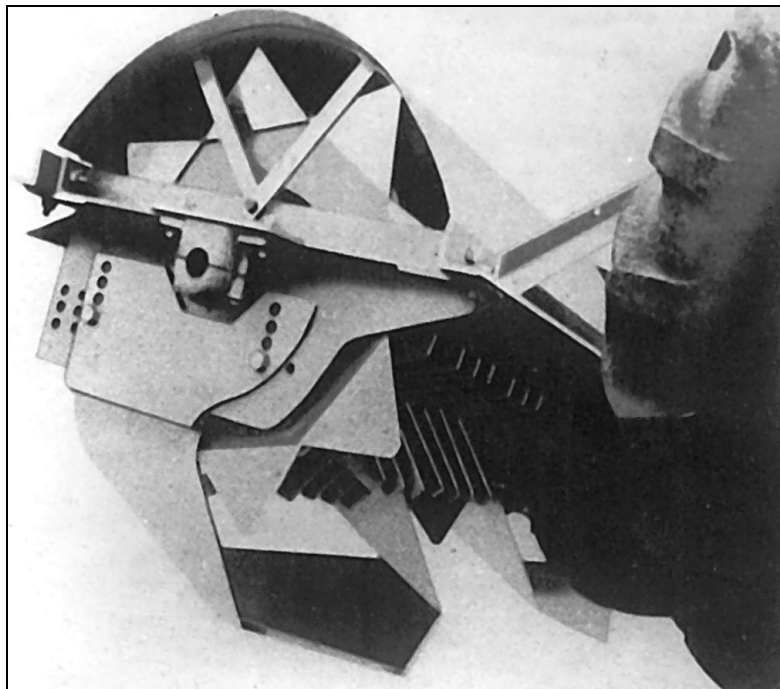
Рис. 1.15. Схема корпуса комбинированного плуга с активным отвалом

1.2. Комбинированные фрезы и ротационные плуги

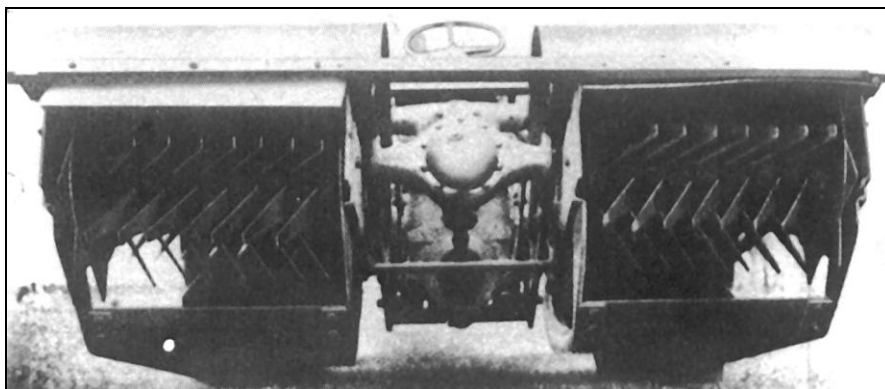
В настоящее время практически все почвообрабатывающие фрезы и ротационные плуги комбинируют с пассивными рабочими органами, преимущественно с рыхлительными стойками, оснащенными стрелчатыми лапами. Дополнительные рыхлители выполняют следующие функции: уменьшают необходимый крутящий момент на валу ножевого барабана и компенсируют горизонтальную и вертикальную составляющие реакции резания почвы ротационных ножей. Известно, что горизонтальная составляющая реакции резания почвы на ротационных ножах, направленная вперед по ходу движения МТА, может достигать величины, вызывающей неуправляемость трактора, а вертикальная составляющая способна выглубить фрезу или ротационный плуг [29, 55].

Одной из первых таких комбинированных тягово-приводных почвообрабатывающих машин был «Мультикультиватор» (рис. 1.16).

«Мультикультиватор» состоит из двух секций шириной захвата 0,75 м каждая. Фрезы установлены над скобообразным лемехом, который подрезает пласт, разламывает его и подает под фрезу, которая ножами производит окончательное крошение и перемешивание почвы. Положение лемехов по отношению к фрезам может изменяться для получения различной степени измельчения почвы. Две секции обрабатывают колею колес трактора. Средняя полоса обрабатывается при последующем проходе МТА. При общей ширине захвата 1,5 м и глубине обработки 0,25 м для работы «Мультикультиватора» требуется трактор мощностью 48 кВт [97].



а



б

Рис. 1.16. «Мультикультиватор» - комбинированная фреза:
а – вид сбоку; *б* – вид сзади

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

На культиваторе-рыхлителе фирмы «Фарина» (Италия) сзади рыхлительных лап устанавливается фреза, которая тщательно рыхлит верхний слой почвы, предварительно разрыхленный культиваторными лапами (рис. 1.17).

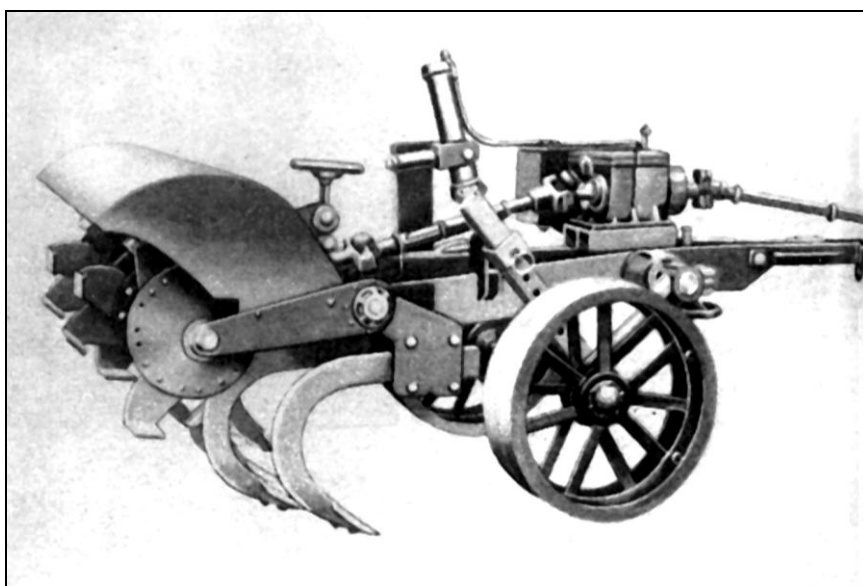


Рис. 1.17. Комбинированный культиватор-рыхлитель с фрезой

Такой фрезерный культиватор-рыхлитель рекомендуется для окультуривания малоплодородных почв (например, солонцовых) с углублением пахотного горизонта без выноса нижних слоев на поверхность.

Фирма «Станден» (Великобритания) предложила комбинированное орудие «Вибро-тиллер», состоящее из культиватора с пружинными зубьями и легкой фрезы (рис. 1.18). «Вибро-тиллер» производит предпосевную обработку почвы после вспашки плугом,

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

заменяя за один проход работу четырех орудий. Пружинные зубья предварительно рыхлят почву, а фреза измельчает комки и глыбы и выравнивает поверхность поля, чему способствует регулируемый по высоте откидной щиток кожуха.

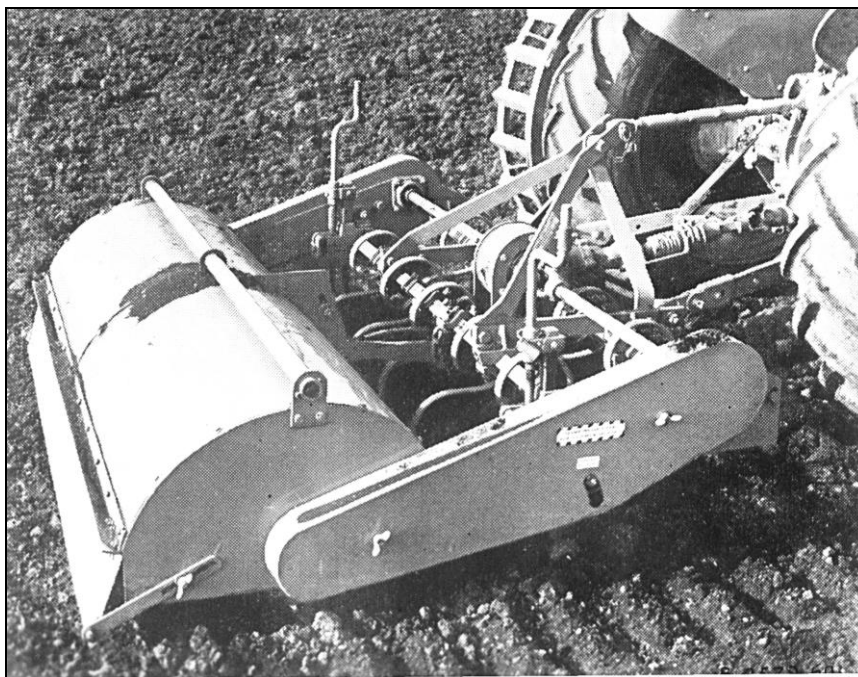


Рис. 1.18. Комбинированная фреза «Вибро-тиллер»

Фирма «Говард Ротаватор» (Великобритания) устанавливает чизельные лапы позади фрезы на глубину до 0,35 м с целью уничтожения подпахотной уплотненной подошвы и улучшения дренирования сырых почв. Такие комбинированные машины под названием «Андербастер» фирма рекомендует применять осенью для основной обработки почвы.

Фирма «Кантоне» (Италия) выпустила две модели фрез-рыхлителей (рис. 1.19).

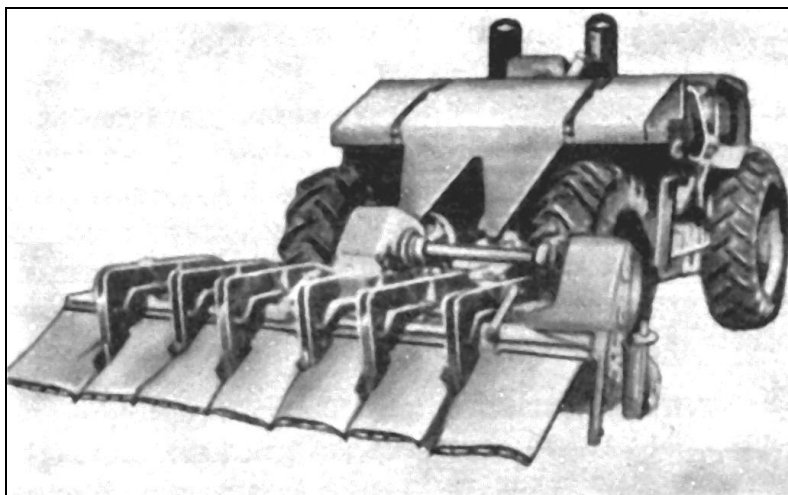


Рис. 1.19 Фреза-рыхлитель фирмы «Кантоне»

Обе модели созданы на базе двухколесной тележки с автономным двигателем и навесной фрезой. Тележка перемещается обычным универсальным колесным трактором, а автономный двигатель приводит во вращение фрезу. Краткая техническая характеристика фрез-рыхлителей приведена в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Техническая характеристика фрез-рыхлителей фирмы «Кантоне»

| Параметры орудия | Марка модели | |
|--|--------------|-----------|
| | PR7 | PR8 |
| Мощность двигателя, кВт | 131 | 265 |
| Рабочая ширина захвата, м | 2,6...2,7 | 3,0...3,2 |
| Общая масса, кг | 8065 | 8635 |
| Максимальная глубина обработки, см | 42-48 | 45-52 |
| Диаметр барабана, мм | 1100 | |
| Количество чизельных лап, шт. | 7 | 8 |
| Дополнительное заглубление чизельных лап, см | 12...18 | |
| Производительность, га/ч | 0,5...1,2 | 0,8...1,5 |

Эффективность комбинированных фрез с тяговыми рабочими органами впервые была исследована А. Eggenmüller в почвенном канале и в полевых условиях [96]. Установка состояла из секции фрезы и прямого лемеха, установленного под углом 20° к дну борозды и перпендикулярно к направлению движения. Положение лемеха по отношению к фрезе, как по высоте, так и в продольном направлении изменялось в широких пределах. Динамометрирование показало, что крутящий момент, необходимый для привода фрезы в предварительно взрыхленной почве в 3 раза, а в комбинации с лемехом в 5 раз меньше, чем для фрезы, работающей в монолитной почве. Однако, в отличие от фрезы, такое комбинированное орудие требует значительно большего тягового усилия, которое лишь частично компенсируется подталкивающей реакцией фрезы.

Качество обработки почвы, т.е. крошение, перемешивание и заделка пожнивных остатков и удобрений комбинированным орудием зависит от взаимного положения фрезы и лемеха, окружной скорости фрезы и поступательной скорости МТА. При испытаниях было отмечено, что на тяжелой почве комбинированное орудие менее интенсивно крошит почву, чем отдельная фреза. Это происходит потому, что часть комков почвы после лемеха сдвигаются ножами фрезы назад, не подвергаясь крошению.

Описанный принцип обработки почвы был использован в машине МР-2, разработанной ГСКБ по почвообрабатывающим машинам (г. Одесса). В этой машине использованы два рабочих органа: плоскорежущий нож и фреза. Плоскорежущий нож имеет на конце сепарирующую решетку, назначение которой – отделять мелкие комки почвы от крупных глыб, образующихся после прохода плоскорежущего ножа [77].

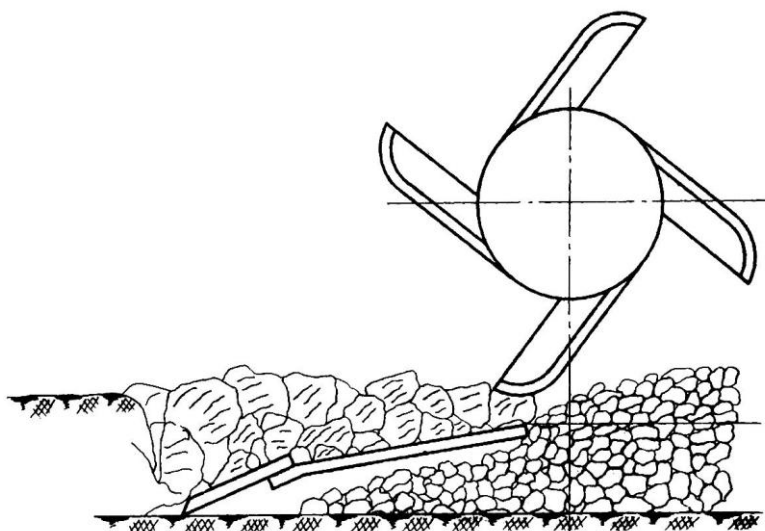


Рис. 1.20. Технологическая схема машины МР-2

Оставшиеся на решетке крупные глыбы почвы измельчаются рабочим органом фрезы. Можно сказать, что в этой машине частично использован принцип дробления почвы по «слабым связям», когда часть монолитной почвы при поступлении на плоскорежущий нож разрушается по имеющимся в ней трещинам.

На рис. 1.21 показана почвообрабатывающая навесная фреза в комбинации с рыхлительными стойками, а на рис. 1.22 – ротационный плуг РП-200 с культиваторными стрелчатыми лапами.

Имитация ручного вскапывания почвы заступом использована в машинах фирмы “Falc” (Италия). Рабочие органы этих машин выполнены в виде широких вогнутых лопат или заступов. Привод рабочих органов осуществляется от ВОМ трактора через кривошипно-шатунный механизм (рис. 1.23).

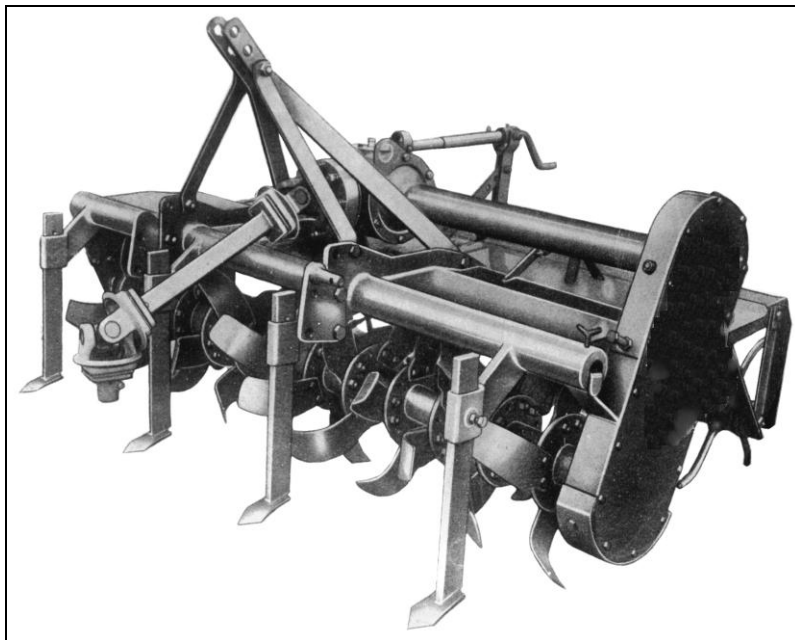


Рис. 1.21. Комбинированная фреза с рыхлительными стойками

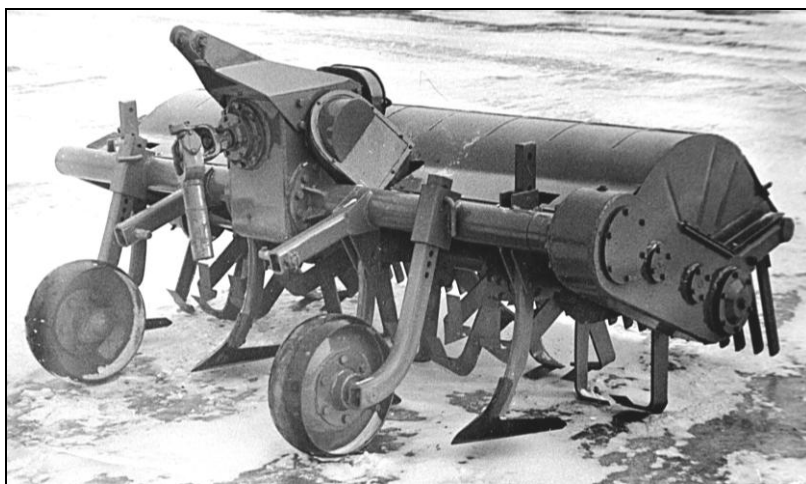


Рис. 1.22. Ротационный плуг РП-200 с культиваторными лапами

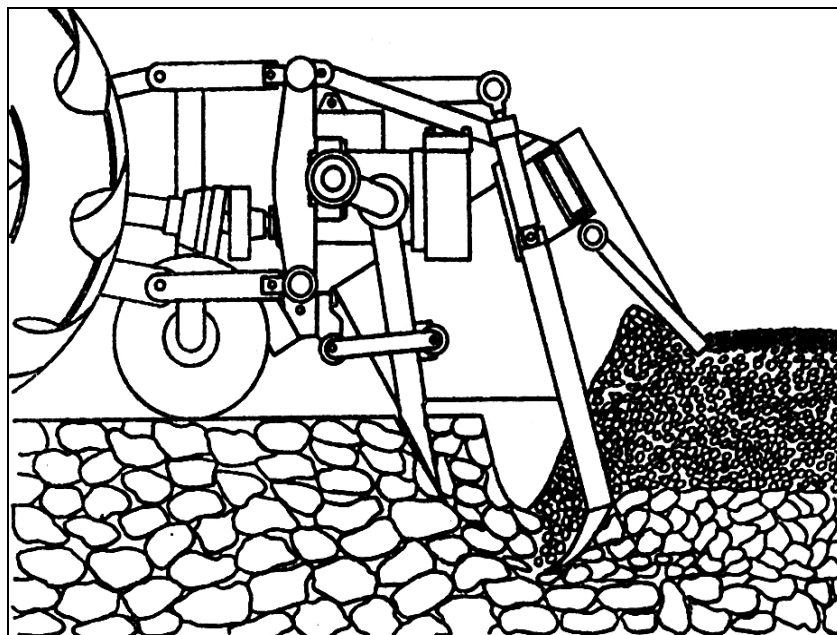


Рис. 1.23. Технологическая схема машины фирмы “Falc”

Рабочий орган машины “Falc” движется в почве по криволинейной траектории, осуществляя отрезание и скалывание пласта почвы. Для компенсации подталкивающей реакции почвы сзади барабана установлены почвоуглубительные лапы, подъем и опускание которых производится гидроцилиндром. Подобное орудие исследовал и усовершенствовал С.Н. Киселев (МГАУ) [32, 33, 34].

Использование конструкций почвообрабатывающих машин с двухпоточным использованием мощности тракторов (так называемой тягово-энергетической концепции) позволяет значительно повысить качество обработки, подготавливая почву под посев за один проход, а также увеличить эффективность использования мощности двигателя и снизить потребность в тракторах высокого тягового класса.

Глава 2. Основы динамики комбинированных почвообрабатывающих машин

При совместной работе тяговых и приводных рабочих органов для решения вопросов динамики МТА необходимо определить силовые характеристики рабочих органов, их оптимальные конструктивные и технологические параметры, потребную мощность и условия устойчивого движения при максимальном КПД агрегата.

Закономерности силового взаимодействия приводных рабочих органов с почвой, причины их высокой энергоемкости изучены достаточно полно во многих научно-исследовательских работах. Силовые характеристики почвообрабатывающих фрез и ротационных плугов рассмотрены в работах А.Д. Далина [24], И.С. Полтавцева [67], П.М. Василенко [10], Ф.М. Канарева [30], Г.Ф. Попова [60], W. Sohne [98], A. Eggenmüller [97], H. Bernacki [95], Z. Mirowski [93] и многих других. Некоторые причины высокой энергоемкости ротационных почвообрабатывающих машин рассмотрены в монографии [59].

Значительно меньше исследований посвящено совместной работе приводных и тяговых рабочих органов. Одним из первых было опубликовано исследование А. Eggenmüller [97], в котором рассмотрена работа фрезерной секции в комбинации с плоскорежущим ножом. В почвенном канале была измерена величина крутящего момента для привода фрезы в трех вариантах:

A – резание плотной почвы (без предварительного рыхления);

B – резание предварительно разрыхленной почвы;

C – резание пласта почвы, находящегося на пассивном плоском ноже.

В результате опытов получено, что средняя величина крутящего момента на предварительно разрыхленной почве в 3 раза, а в случае *C* в 5

раз меньше, чем для фрезы, работающей в плотной почве. Тяговое усилие, необходимое для протаскивания плоского ножа, частично компенсировалось подталкивающей реакцией фрезы, направленной вперед по ходу движения. В полевых условиях крутящий момент фрезы, работающей в предварительно разрыхленной почве, снижался на 30...40%. По удельной энергоемкости комбинированная фреза была в 1,5 раза эффективнее, чем фреза, работающая на плотной почве.

Z. Mirowski в работе «Теоретические основы работы плуго-фрез» [93] пришел к выводу, что мощность для комбинированного плуга складывается из мощности на подрезание пласта корпусом плуга N_1 и мощности ротора на отбрасывание части пласта N_2 :

$$N = N_1 + N_2 = A(v_0 - v) + B \frac{v_0 - v}{v_0} v,$$

где $A = ab_1zik/(150\pi R)$;

$$B = ab_2\rho Rv_3/g \cdot i;$$

b_1 – ширина захвата корпуса плуга;

i – число рядов лопаток или ножей;

R – средний радиус ротора;

z – число ножей в ряду;

b_2 – ширина лопатки или ножа;

v_3 – скорость пласта;

k – удельное сопротивление резанию.

Из приведенного уравнения видно, что в нем не учтен ряд факторов, влияющих на величину мощности комбинированного корпуса, в частности, не учитывается толщина отрезаемой лопаткой или ножом стружки, скорость резания, конструктивные параметры корпуса и ротора и ряд других факторов.

В работе [95] Н. Вернаски сделал ряд ценных наблюдений. Он пришел к выводу, что при работе фрез усилие резания складывается из

статической и динамической составляющих. Причем **динамическая составляющая, возникающая при резании почвы, составляет основную часть сил сопротивления**. Усилие отбрасывания почвы, по его мнению, составляет лишь 20% общей динамической силы. Следует отметить, что к такому же выводу пришел еще раньше А.Д. Далин [24].

Работы А.Д. Далина, П.В. Павлова, W. Sohne, A. Eggenmüller, H. Bernacki [94], Z. Mirowski по существу заложили основы дальнейшего развития теории фрезерных (ротационных) почвообрабатывающих машин и их комбинации с тяговыми рабочими органами.

Почвообрабатывающие машины с приводными рабочими органами (почвообрабатывающие фрезы, ротационные плуги) обладают рядом технологических преимуществ по сравнению с традиционными лемешно-отвальными плугами, культиваторами, боронами и т.п. традиционными машинами, в том числе они могут использоваться в широком диапазоне состояния почвы. Однако их большему распространению препятствует высокая энергоемкость и малая производительность [59].

Работами многих ученых было установлено, что основными факторами повышенной энергоемкости ротационных машин являются:

- высокие скорости резания почвы,
- повышенное крошение почвы,
- интенсивное отбрасывание отрезанных стружек,
- увеличенная суммарная длина режущей кромки.

2.1. Методы снижения энергоемкости ротационной обработки почвы

Поискам снижения энергоемкости ротационной обработки почвы посвящено много научных исследований. Обобщение накопленного опыта позволяет выделить следующие основные направления решения этой проблемы (рис. 2.1):

1. Оптимизация конструктивных и технологических параметров рабочих органов и машин в целом;
2. Оптимизация режимов работы;
3. Предварительное изменение состояния обрабатываемой почвы;
4. Сепарация почвы в процессе обработки;
5. Дробление почвы ротором в ее взвешенном состоянии;
6. Снижение суммарной длины режущей кромки;
7. Применение зубообразных роторов.

Рассмотрим реализацию и достигаемый эффект перечисленных направлений.

Многочисленные сравнительные испытания показали, что выполнение различными по форме рабочих органов - Г-образных ножей, полевых крючков, плоских и пружинных зубьев [79], а также оптимизация таких параметров, как радиус загиба, углы заточки и установки ножей, не приводят к значительному энергетическому эффекту.

Сохранение постоянным угла резания в процессе фрезерования, предложенное Г.Ф. Поповым [66], позволяет снизить крутящий момент на 25%. Однако, на практике это значительно усложняет конструкцию орудия.

Уменьшение диаметра фрезерного барабана дает ощутимый эффект [21]. Однако значительному уменьшению диаметра препятствует усложнение привода барабана, а также размещение конструктивных элементов крепления ножей.

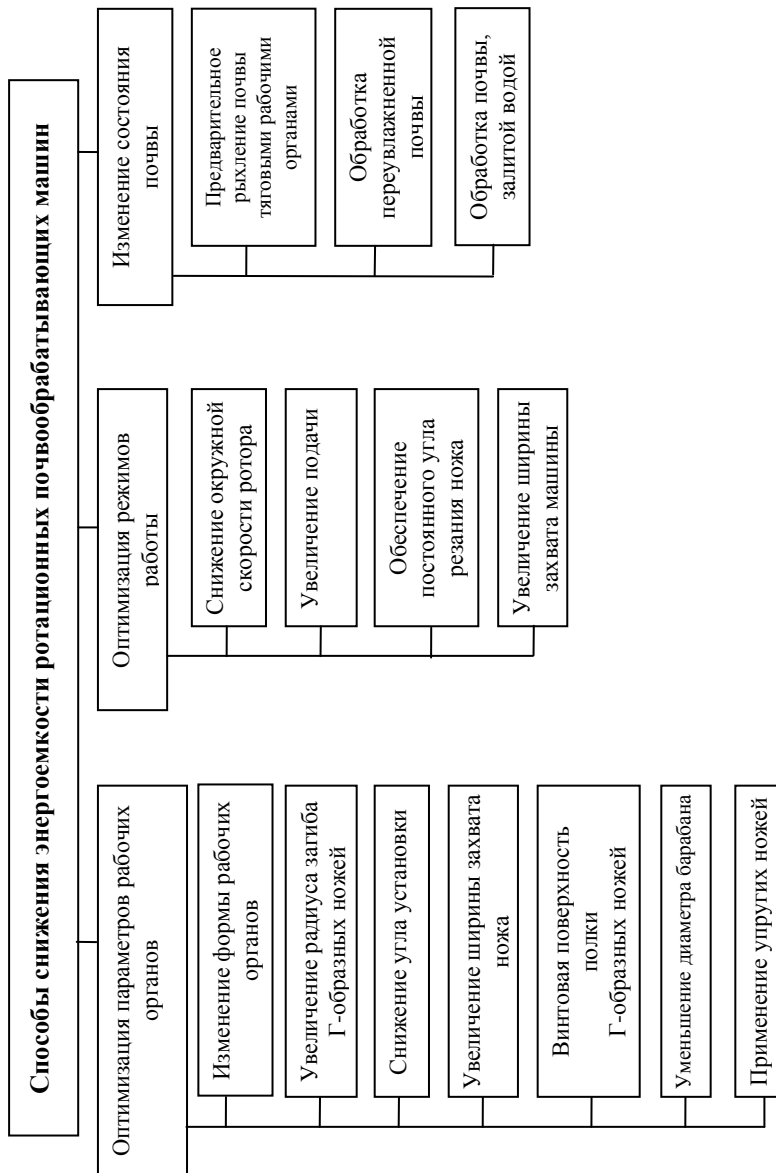


Рис. 2.1. Способы снижения энергоемкости ротационной обработки почвы

По данным Н. Bernacki [39, 95], Г.Ф. Попова [66] и других увеличение окружной и поступательной скоростей фрезы при постоянной подаче приводит к возрастанию энергии на фрезерование по зависимости второго порядка. Поэтому для снижения энергозатрат следует работать на низких скоростях. Однако это противоречит требованию достижения высокой производительности.

В ряде публикаций [31, 41] рекомендуется работать на возможно больших подачах на нож, допустимых агротребованиями. Снижение энергоемкости в этом случае достигается благодаря менее интенсивному крошению почвы и уменьшением суммарной длины режущей кромки. Однако, практикой доказано, что увеличение подачи на фрезерных режимах более 15...17 см, а на пахотных режимах более 25 см, лимитируется величиной гребнистости дна борозды $h_{гр}$, которая не должна превышать допустимые пределы ($h_{гр} \leq 0,2a$, где a – глубина обработки) [72].

Некоторого снижения энергоемкости (до 10...15%) можно добиться при уменьшении сил трения на поверхностях рабочих органов путем покрытия их полимерными материалами, подачей воздушной или водяной смазки в граничный слой металл–почва. Однако эти способы практически не применимы для узких фрезерных ножей.

Значительного снижения энергоемкости ротационной обработки почвы следует ожидать от способов третьего направления: **предварительного изменения состояния почвы.** Изменить монолитное состояние почвы можно либо путем предварительного рыхления ее тяговыми рабочими органами, установленными впереди ротационных рабочих органов, либо путем обработки переувлажненной или залитой водой почвы. В этом случае снижаются твердость и прочность почвы. При

резании таких почв даже на высоких рабочих скоростях можно ожидать значительного снижения динамической части сопротивления, а также затрат энергии на отброс почвы.

Как известно [20, 59], почва в естественно-сложенном состоянии представляет собой дисперсную трехфазную систему, состоящую из твердых частиц, промежутки между которыми заполнены газовой и водной средой. При динамическом ударном воздействии на такую систему она проявляет упругие и вязкие свойства, а сопротивление деформации обусловлено силами сцепления и внутреннего трения [26], которые в свою очередь, зависят от ее механического состава, химических, электростатических и цементационных свойств и влажности [52]. С повышением упругости почвы сопротивление резанию увеличивается, а с повышением влажности – падает.

При переувлажнении почвы или, тем более, при полностью залитых водой почвах (рис. 2.3) значительно снижаются её прочностные характеристики, т.к. на основании теории коллоидов, физико-механические свойства обусловлены характером внутренних связей между почвенными агрегатами, количественно зависящими от влажности [65].

При повышении влагосодержания механическая прочность почв снижается, т.к. между частицами образуются тонкие пленки воды, играющие роль «смазки» при деформации почвы рабочими органами. Так, по данным П.У. Бахтина [77], повышение абсолютной влажности дерново-подзолистой суглинистой почвы в пределах 10...20% приводит к снижению твердости почвы в 2 раза. При дальнейшем переувлажнении почвы, когда все поры заполняются водой, почвенная масса приобретает текучие свойства и становится подвижной. При обработке такой массы следует ожидать значительного снижения энергозатрат.



Рис. 2.3. Работа ротационного плуга в рисовом чеке, залитом водой

Однако устойчивость структуры почвы, обработанной в переувлажненном состоянии, может быть недостаточной. С другой стороны обработка почвы в таком состоянии возможна только комбинированной машиной.

Многочисленными опытами доказано, что сила сопротивления резанию увеличивается с повышением скорости резания. Это объясняется

повышением прочностных характеристик почвы и увеличением затрат на отбрасывание почвенных частиц.

Установлено [16], что деформации разрушения распространяются в почве с конечной скоростью, соизмеримой со скоростью резания, что обусловлено ее трехфазным строением. При большой скорости нагружения в почве сначала возникают упругие волны напряжений, перемещающиеся со скоростью звука для данного материала, и достигающей до 1500 м/с. Затем, вслед за упругими волнами деформаций распространяются волны пластического течения, скорость которых не превышает 10...12 м/с [23]. Скорости резания ротационными рабочими органами могут достигать 10...15 м/с. Из этого следует, что если скорость резания не превышает скорости пластической деформации, то рабочий орган движется в почве, внутренние связи которой нарушены. Если же скорость резания превышает скорость пластической деформации, как это имеет место при работе ротационных рабочих органов, то рабочий орган должен преодолевать дополнительное сопротивление, двигаясь в среде, внутренние связи которой не нарушены [16].

В общем случае сопротивление почвы резанию ротационными рабочими органами можно выразить следующей общей зависимостью

$$P = f(\sigma, \tau, \rho, p, W, a, b, s, v, v_0, v_a), \quad (2.1)$$

где σ, τ – предельные напряжения растяжения (сжатия и сдвига);
 ρ, p, W – плотность, твердость, влажность почвы;
 a, b, s – глубина, ширина резания и подача на нож;
 v, v_0, v_a – поступательная, окружная и абсолютная скорости резания.

Из уравнения (2.1) следует, что технологические параметры a, b, s и кинематические параметры v, v_0, v_a процесса являются заданными и, как было показано выше, за их счет невозможно значительно уменьшить

сопротивление резанию. Существенно уменьшить сопротивление можно лишь воздействуя на показатели состояния почвы ρ , p , W .

На основании выше изложенного, сформулируем первую рабочую гипотезу: *«Для снижения энергоемкости обработки почвы ротационными рабочими органами необходимо изменить исходное состояние почвы путем уменьшения ее плотности и твердости, предварительным рыхлением тяговыми рабочими органами, или путем повышения ее влажности».*

Данные теоретические предпосылки и рабочая гипотеза нуждаются в экспериментальной проверке.

2.2. Ударное взаимодействие ротационных рабочих органов с почвой

С целью более глубокого изучения процесса ротационной обработки почвы рассмотрим аспекты ударного воздействия рабочих органов на почву.

Энергетика обработки почвы определяется главным образом характером напряженно-деформированного состояния, создаваемого рабочими органами почвообрабатывающих машин. В работах Ю.Ф. Новикова [53], Г.А. Деграф [23], А.Н. Гудкова [22] и др. установлено, что даже при работе на низких скоростях 2...3 м/с взаимодействие рабочих органов с почвой можно рассматривать с позиций ударного процесса [59]. Такое понимание вполне согласуется с современными представлениями о процессе удара.

Классическая механика рассматривает удар как явление, при котором за бесконечно малый промежуток времени скорость соударяющихся тел изменяется на конечную величину [42]. Более полное представление об ударном процессе дает положение о том, что часть или

вся кинетическая энергия соударяющихся тел переходит в энергию деформации [2].

Роль предварительного рыхления почвы рассмотрим сначала на основе положений классической механики удара [30], в которой ударный импульс для не вполне упругих тел выражается зависимостью

$$Pt = (1 + k_B) \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} v_a, \quad (2.2)$$

где k_B – коэффициент восстановления;

m_1 – приведенная масса рабочего органа и привода;

m_2 – масса почвы;

v_a – скорость соударения (в нашем случае – скорость резания).

Из уравнения (2.2) следует, что величина ударного импульса прямо пропорциональна коэффициенту восстановления k_B , величина которого колеблется от 1 (упругие тела) до 0 (пластичные тела). Для сухих твердых почв $k_B = 0,4$, для почв влажностью 20% величина $k_B = 0,2 \dots 0,3$ [4]. Диапазон значений $k_B = 0 \dots 0,4$ охватывает большинство состояний почв.

В классической механике коэффициент восстановления служит мерой упругих свойств материалов. Поэтому для рыхлой почвы коэффициент k_B будет близок к нулю. Из формулы (2.2) следует, что изменение коэффициента k_B от 0 до 1 может изменять импульс силы в интервале $1 \leq Pt \leq 2$. Уменьшение ударного импульса на предварительно разрыхленной почве по сравнению со связной обусловлено также относительным уменьшением массы почвы, вовлекаемой в ударный процесс, ввиду ослабления межагрегатных связей при предварительном рыхлении.

Положительное влияние предварительного рыхления на энергозатраты объясняется также современным пониманием удара как

волнового процесса [74]. Согласно этой теории одним из основных показателей ударного процесса является коэффициент передачи энергии $k_{\mathcal{E}}$, выражающий отношение кинетической энергии тел после удара к кинетической энергии до удара.

Для неупругих тел скорости после удара одинаковы и равны [71]:

$$v_1 = v_2 = \frac{m_1 v_0 + m_2 v'_0}{m_1 + m_2}. \quad (2.3)$$

При $v'_0 = 0$ для монолита почвы

$$v_1 = v_2 = \frac{m_1 v_0}{m_1 + m_2}. \quad (2.4)$$

Кинетическая энергия тел до удара

$$\mathcal{E}_0 + \mathcal{E}'_0 = \frac{m_1 v_0^2}{2} + \frac{m_2 v'^2_0}{2(m_1 + m_2)}. \quad (2.5)$$

Кинетическая энергия тел после удара

$$\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = \frac{(m_1 v_0 + m_2 v'_0)^2}{2(m_1 + m_2)}. \quad (2.5)$$

Разность этих кинетических энергий представляет собой потерю энергии, расходуемую на деформацию тел

$$\mathcal{E}_p = (\mathcal{E}_0 + \mathcal{E}'_0) - (\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2) = \frac{m_1 m_2 (v_0 + v'_0)^2}{2(m_1 + m_2)}. \quad (2.7)$$

Рассмотрим в качестве примера удар двух стержней. По волновой теории в ударе участвует вся масса стержня m_1 и часть массы стержня m_2 . Эта часть называется критической и определяется формулой [71]

$$m_{KP} = t \rho c_y F, \quad (2.8)$$

где $t = \frac{2l_1}{c_y}$ - время удара;

$c_y = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ - скорость распространения волн напряжения в данном

материале;

F – площадь поперечного сечения стержня;

l_1 – длина стержня.

Е.В. Александров и В.Б. Соколинский объединили классическую и волновую теории удара, заменив массу m_2 критической массой [2]. Тогда кинетическая энергия, отдаваемая массе m_2 , выразится

$$\mathfrak{E}_2 = \frac{4m_1^2 v_0^2}{2(m_1 + m_{KP})^2}. \quad (2.9)$$

В этом случае коэффициент передачи энергии от одного тела к другому будет равен

$$k_{\mathfrak{E}} = \frac{4m_1^2 v_0^2}{2(m_1 + m_{KP})^2} : \frac{m_1 v_0^2}{2} = 4 \frac{m_1 m_{KP}}{(m_1 + m_{KP})^2}. \quad (2.10)$$

Однако, как отмечается в монографии [7], ни одна из теорий не дает прямого метода расчета разрушения тел, поэтому приходится использовать экспериментальные исследования.

В опытах [71] получено, что энергия идущая на разрушение образца составляет 50...80% энергии, поглощаемой на деформацию пластического тела.

На основании опытов по дроблению камней в роторной дробилке был составлен баланс энергии (рис. 2.2).

На графике по оси абсцисс отложена энергия \mathfrak{E}_1 , отданная бойком при ударе, а по оси ординат – ее распределение \mathfrak{E}_2 : на разрушение камня

\mathcal{E}_P и на изменение скорости камня и его осколков \mathcal{E}_V . Из графика рис. 2.2 следует, что значительная часть энергии идет на сообщение продуктам дробления скорости отбрасывания. Соотношение между \mathcal{E}_P и \mathcal{E}_V равно примерно 1:3.

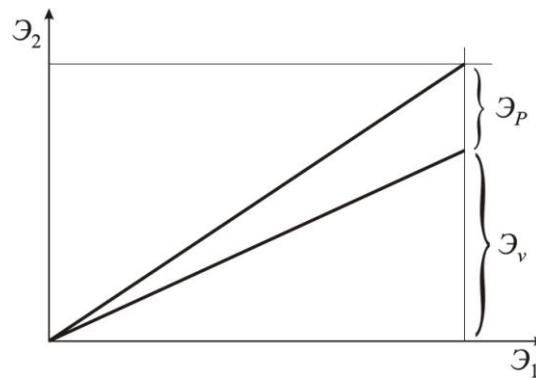


Рис. 2.2. Схема распределения энергии поглощенной камнем при ударе

Более наглядное положительное влияние предварительного рыхления на энергозатраты показывает схема, предложенная Е.В. Александровым [2]. При проходе ударной волны через граничные поверхности, например, трех почвенных комков, коэффициент передачи энергии удара равен

$$k_{\mathcal{E}} = \frac{4C_1C_2}{(C_1 + C_2)^2} \left[1 - \frac{A''(1 - A^n)}{n(1 - A)^2} (2 + A'' - A''^{n-1}) \right], \quad (2.11)$$

$$\text{где } A'' = \frac{(C_1 - C_2)(C_3 - C_2)}{(C_1 + C_2)(C_3 + C_2)};$$

C_1, C_2 и C_3 – ударная жесткость комков 1, 2 и 3.

Ударная жесткость i -го комка равна

$$C_i = F_i \rho_i C_{y_i}, \quad (2.12)$$

где F_i – площадь поперечного сечения комка;
 ρ_i – плотность комка;
 C_{y_i} – скорость распространения продольной волны.

Показатель степени n равен

$$n = \frac{l_1 C_{y_2}}{l_2 C_{y_1}}, \quad (2.13)$$

где l_1 – приведенная длина рабочего органа;
 l_2 – длина комка.

Из уравнения (2.10) следует, что энергия ударной волны затухает тем быстрее, чем больше разница между величиной комков и чем больше граничных поверхностей, т.е. чем выше степень крошения почвы. Ухудшение передачи энергии от комка к комку приводит к снижению скорости их отбрасывания и, в конечном итоге, к снижению энергоемкости ротационной обработки почвы.

2.3. Сопротивление почвы при работе ротационных рабочих органов

Из анализа работ, посвященных энергетике ротационных рабочих органов, следует, что сопротивление их складывается из сил сопротивления резанию стружки, её крошения и отбрасывания.

При работе ротационные рабочие органы одновременно участвуют в двух движениях: переносном вместе с машиной с поступательной скоростью v и относительном – вращении вокруг своей оси с угловой скоростью ω . Сочетание этих двух движений формирует своеобразную траекторию рабочих органов – циклоиду и соответствующую форму отрезаемой стружки (рис. 2.4).

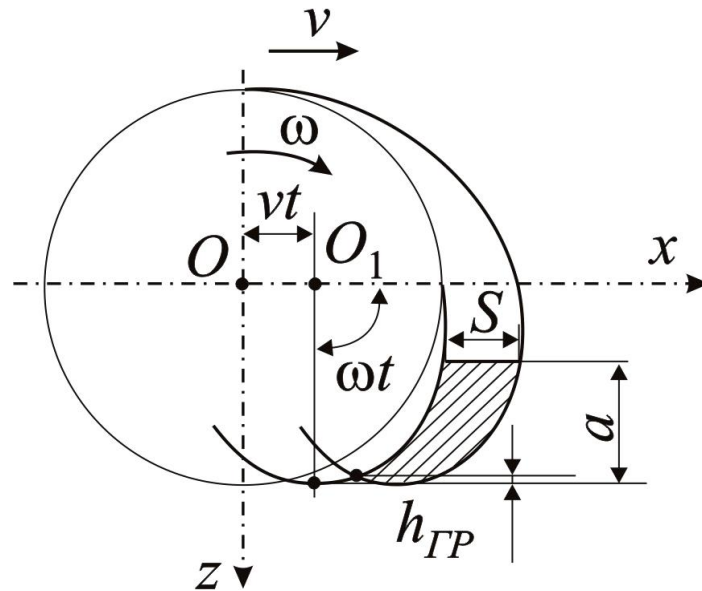


Рис. 2.4. Схема формирования траектории ротационного рабочего органа и отрезаемой стружки где: a – глубина резания; s - подача; $h_{ГР}$ - высота гребня; ω - угловая скорость вращения; v - поступательная скоростью.

Траектория рабочих органов также зависит от расположения ножевого барабана относительно поля. Анализ и выбор технологических и технологических параметров ротационных машин с различным расположением ножевого барабана относительно обрабатываемой поверхности поля рассмотрен в монографии [59], а также в трудах Ф.М. Канарева, П.М. Василенко и др.

Ввиду значительных трудностей раздельного определения составляющих сил сопротивления, воспользуемся общим законом сопротивления при технологических процессах, разработанным В.П. Горячкиным.

Согласно этому закону, сопротивление на ротационных рабочих органах может быть представлено суммой сопротивлений

$$P = P_{TP} + P_P + P_{OTB}, \quad (2.14)$$

где P_{TP} – сопротивление трения ротационных ножей о почву;
 P_P – сопротивление резанию стружки;
 P_{OTB} – сопротивление на сообщение скорости отбрасываемой стружке.

По данным Ю.С. Леонтьева [40], силы трения ротационных рабочих органов имеют незначительную величину, поэтому при приближенных расчетах ими можно пренебречь.

Сопротивление резанию стружки по аналогии с тяговыми рабочими органами можно представить зависимостью

$$P_P = k_P \delta_{CP} b, \quad (2.15)$$

где k_P – коэффициент удельного сопротивления резанию почвы;
 δ_{CP} – средняя толщина стружки;
 b – ширина захвата Г-образного ножа.

Коэффициент удельного сопротивления резанию почвы k_P определяется экспериментальным путем и зависит не только от параметров рабочего органа, но и от состояния почвы, скорости резания и от размеров отрезаемой стружки. По данным А.Д. Далина, коэффициент k_P для фрез с подачей $s = 5 \dots 12,5$ см на тяжелой супеси равен $0,66 \dots 0,89$ МПа, на залежи $0,77 \dots 1,15$ МПа.

По данным В.С. Сурилова [78] коэффициент k_P на тяжелом суглинке при подаче $s = 6 \dots 12$ см равен $0,75 \dots 0,93$ МПа. А.Д. Далин и П.В. Павлов [24] установили, что увеличение подачи в 3 раза снижает k_P почти в 2 раза, а тройное увеличение ширины стружки b сокращает k_P только на 30%. Это объясняется тем, что подача в большей степени влияет

на степень крошения почвы, которая является определяющим фактором энергоемкости ротационной обработки почвы. Также при большей подаче снижается суммарная удельная длина режущей кромки (см. фактор 6, с. 40). Меньшее влияние увеличения ширины стружки b на коэффициент k_P объяснимо особенностями механики внедрения ножа, при которой наибольшую энергоемкость имеет лидирующая часть ножа. Эти особенности подробно исследованы для стрелчатых лап и лемехов отвальных плугов. С этим связан фактор 7 снижения энергоемкости (с. 40).

Можно также предполагать, что на предварительно взрыхленной почве коэффициент k_P будет значительно меньше, чем на плотной (фактор 3, с. 40). Это утверждение нуждается в экспериментальной проверке.

Разделение общего сопротивления при ротационной обработке почвы на P_P и $P_{ОТБ}$ достаточно условно, т.к. отброс почвы происходит как в момент ее резания, так и при проходе ножа через массу уже отрезанной почвы и увлечение части ее во вращательное движение.

Рассмотрим более подробно процесс отбрасывания почвы при ударном характере взаимодействия ротационного ножа с почвой [87].

При рассмотрении взаимодействия частицы почвы с полкой Г-образного ножа, установленного под углом резания α и движущейся со скоростью v_P [87], воспользуемся принципом обратимости движения. Примем, что материальная точка ударяется о неподвижный нож со скоростью v_P под углом $90^\circ - \alpha$ (рис. 2.5).

Нормальные составляющие скорости частицы связаны соотношением

$$\frac{v_n^{OT}}{v_n^P} = k_B, \quad (2.16)$$

где k_B – коэффициент восстановления [42].

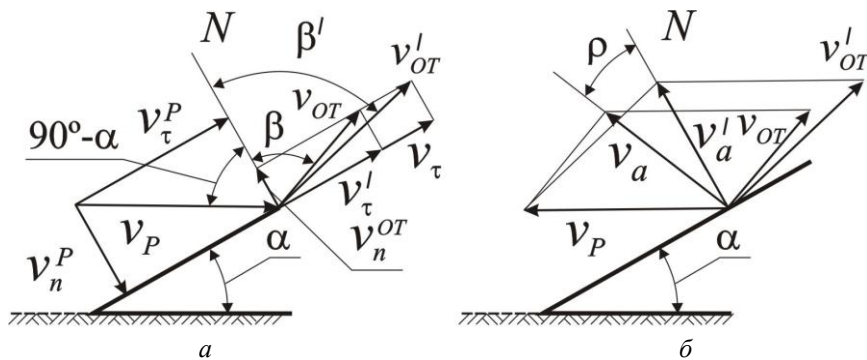


Рис. 2.5. Схема взаимодействия полки Г-образного ножа с почвой (по В.А. Юзбашеву):
 а – определение относительной скорости;
 б – определение абсолютной скорости отбрасывания частицы почвы

Касательная составляющая относительной скорости частицы после удара v_τ зависит от мгновенного коэффициента трения f'

$$v_\tau = (1 - f')v_\tau^P, \quad (2.17)$$

где v_τ^P - касательная составляющая скорости v_P после удара.

Относительная скорость движения частицы после удара определится из уравнения

$$v_{OT} = \sqrt{\cos^2 \alpha (1 - f')^2 + k_B^2 \sin^2 \alpha} \cdot v_P. \quad (2.18)$$

Величина скорости v_{OT} за время отрезания стружки изменяется, т.к. и скорость v_P и угол α не остаются постоянными [72].

После удара о нож частицы почвы отражаются по направлению, отклоненному от нормали N под углом отражения β . Углы падения частицы ($90^\circ - \alpha$) и отражения β связаны зависимостью

$$\frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg}(90^\circ - \alpha)} = \frac{v_\tau v_n^P}{v_n^{OT} v_\tau^P} = \frac{1 - f'}{k_B}. \quad (2.19)$$

Отсюда найдем

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{1 - f'}{k_B \operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.20)$$

Если принять $f' = 0$, то

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{1}{k_B \operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.21)$$

Абсолютная скорость v_a движения частиц почвы после удара определится из векторной суммы относительной v_{OT} и переносной v_P скоростей (рис. 2.5, б):

$$\begin{aligned} v_a &= \sqrt{v_{OT}^2 + v_P^2 - 2v_{OT}v_P \cos(90^\circ - \alpha - \beta)} = \\ &= v_P [1 + \cos^2 \alpha (1 - f)^2 + k_B^2 \sin^2 \alpha - \\ &\quad - 2\sqrt{(1 - f)^2 \cos^2 \alpha + k_B^2 \sin^2 \alpha} \times \\ &\quad \times \cos(90^\circ - \alpha - \operatorname{arctg} \frac{(1 - f) \operatorname{ctg} \alpha}{k_B})]^{1/2}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Последнюю формулу преобразуем

$$v_a = v_P k_v, \quad (2.23)$$

где

$$\begin{aligned} k_v &= [1 + \cos^2 \alpha (1 - f)^2 + k_B^2 \sin^2 \alpha - \\ &\quad - 2\sqrt{(1 - f)^2 \cos^2 \alpha + k_B^2 \sin^2 \alpha} \times \\ &\quad \times \cos(90^\circ - \alpha - \operatorname{arctg} \frac{(1 - f) \operatorname{ctg} \alpha}{k_B})]^{1/2}. \end{aligned} \quad (2.24)$$

График расчетной скорости v_a по формуле (2.22) представлен на рис. 2.6 при разных значениях угла α и коэффициента k_B , коэффициент f принят равным 0,5 [24].

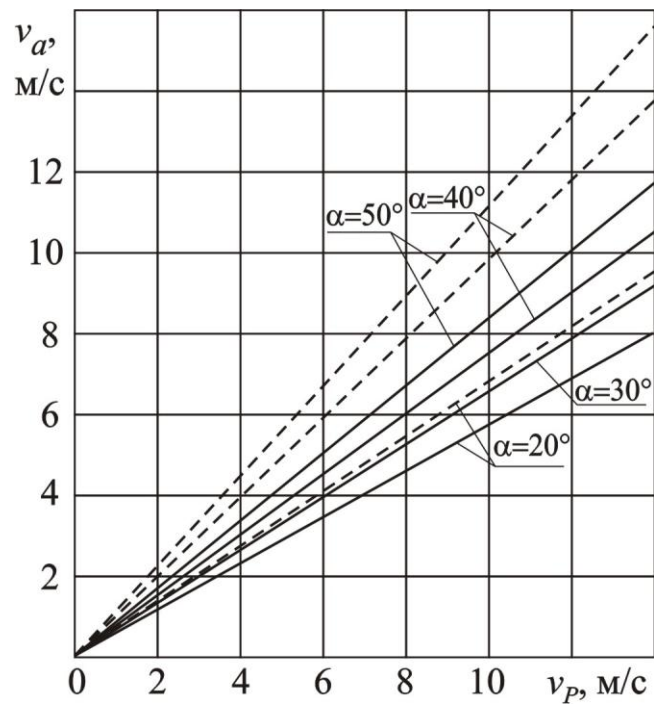


Рис. 2.6. Зависимость абсолютной скорости движения частиц почвы v_a от скорости резания v_p при разных значениях угла резания α :
 ————— $k_B = 0$; - - - - - $k_B = 0,4$

Из графика следует, что с ростом скорости резания v_p величина скорости v_a увеличивается по линейной зависимости. Снижение угла резания и упругих показателей почвы k_B значительно уменьшают скорость отбрасывания почвы.

Усилие отбрасывания P_{OTB} определим на основании теоремы об изменении количества движения материальной точки

$$dm(\bar{v}_a - \bar{v}_1) = \bar{P}_{OTB} dt. \quad (2.25)$$

Начальная скорость частиц почвы до их взаимодействия с ножом v_1 равна нулю. Тогда из уравнения (2.25) имеем

$$\bar{P}_{OTB} = \frac{dm}{dt} \bar{v}_a.$$

Средняя масса почвы, поступающая на нож в единицу времени, равна

$$m' = ab\delta_{CP}\rho v_a. \quad (2.26)$$

С учетом уравнения (2.23) получим

$$P_{OTB} = ab\delta_{CP}\rho v_P k_v v_a = ab\delta_{CP}\rho k_v^2 v_P^2. \quad (2.27)$$

Так как $\delta_{CP} = s \cos \varphi$, то

$$P_{OTB} = abs \cos \varphi k_v v_P^2. \quad (2.28)$$

Из уравнения (2.27) следует, что часть силы резания расходуется на отбрасывание почвенных частиц P_{OTB} и величина ее прямо пропорциональна объему отрезаемой стружки $V = ab\delta_{CP}$, плотности почвы ρ и квадрату скорости резания v_P^2 . Усилие P_{OTB} является переменной величиной, т.к. в процессе резания изменяется скорость резания и толщина отрезаемой стружки.

На рис. 2.7 приведен график P_{OTB} в зависимости от скорости резания, рассчитанный по уравнению (2.28).

Из графика следует, что P_{OTB} с ростом скорости резания возрастает по параболической зависимости. Уменьшение угла резания α и

упругих свойств почвы приводит к некоторому снижению $P_{ОТБ}$. Ввиду того, что угол резания нельзя уменьшить значительно, остается практически единственный путь уменьшения $P_{ОТБ}$: за счет снижения k_B путем предварительного рыхления почвы.

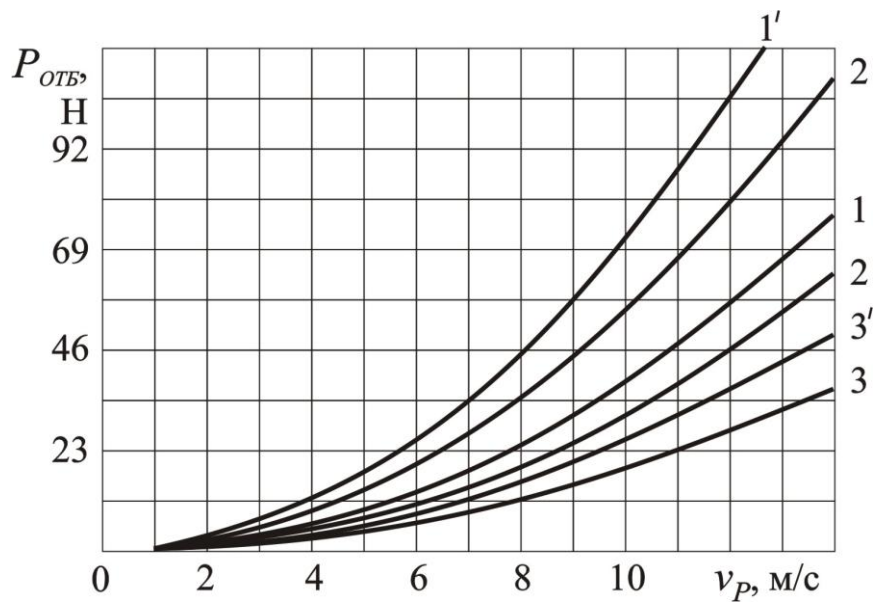


Рис. 2.7. Зависимость сопротивления отбрасыванию почвы $P_{ОТБ}$ от скорости резания v_P и различных значениях α :
 1, 1' - 50°; 2, 2' - 40°; 3, 3' - 20°;
 $k_B = 0$ (1-3) и $k_B = 0,4$ (1'-3')
 ($\rho = 1,4 \cdot 10^4$ кг/м³; $a = 0,15$ м; $b = 0,3$ м; $k_B = 0,5$)

Таким образом, предварительное рыхление почвы приводит к снижению обеих составляющих силы сопротивления P_P и $P_{ОТБ}$. Этот вывод совпадает с утверждением Н. Вернаски о том, что предварительное рыхление уменьшает не только статические, но и динамические составляющие силы резания ротором [92].

Силу трения можно представить приближенно выражением

$$P_T = \nu G_{II} f = \nu mgf = ab\delta C_p \rho gf, \quad (2.29)$$

где G_{II} – сила тяжести отбрасываемой почвы;

ν – коэффициент, учитывающий часть отбрасываемой почвы.

Полное сопротивление резанию почвы одним Г-образным ножом можно представить уравнением

$$\bar{P}_i + \bar{P}_p + \bar{P}_{OTB} + \bar{P}_T \quad (2.30)$$

или

$$P_i = k_p b s c \cos \varphi + ab\delta_{CP} k_{OTB} v_p^2 + \nu abs \rho gf \cos \varphi. \quad (2.31)$$

Для определения общей силы резания всех ножей, находящихся в работе, получим

$$P = \sum_1^{z_p} P_i z'_p, \quad (2.32)$$

где z'_p – число одновременно работающих ножей, равное

$$z'_p = \frac{\varphi_K}{\Delta\varphi} = \frac{\varphi_K z}{2\pi} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} z, \quad (2.33)$$

где z – общее число ножей на машине;

$\Delta\varphi$ – угол между соседними ножами;

φ_K – угол контакта, соответствующий началу φ_1 и завершению φ_2 в процессе резания стружки ($\varphi_K = \varphi_2 - \varphi_1$).

По данным [13] потери на трение составляют 25...36%, а мощность отбрасывания почвы 4...24% от общей мощности, что, по нашему мнению, является значительным преувеличением. Согласно нашим данным [59] сопротивление на отбрасывание почвы и преодоление трения в сумме составляют 10...12% от статической силы резания. По данным Н. Вернаски сопротивление отбрасыванию почвы составляет 6,5...22% от динамической составляющей резания.

Все ротационные почвообрабатывающие машины (ротационные плуги; болотные, полевые и пропашные фрезы) снабжаются защитными кожухами, которые не только защищают ножевой барабан, но и предотвращают излишнее разбрасывание почвы. Кожух, как правило, состоит из цилиндрической части, покрывающей барабан, и откидного щитка. Кроме того, кожух со щитком служат для дополнительного крошения почвы, распределения и заделки минеральных и органических удобрений, заделки дернины [43]. На рис. 2.8 показаны схемы работы полевой фрезы с опущенным и открытым щитком. Во втором случае факел разброса почвы по дальности и ширине весьма значителен.

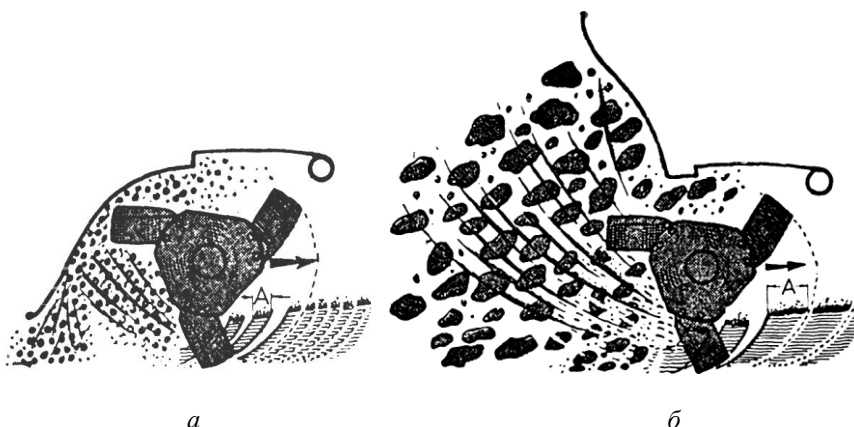


Рис. 2.8. Схема отбрасывания почвы фрезерным барабаном:
а – при опущенном щитке; б – при открытом щитке

Эксперименты [74] показали, что при установке кожуха и фрезерного барабана с зазором от 5 см до 20 см степень крошения почвы осокового болота не изменялась и была равна 72...77%. Однако, энергоёмкость с увеличением зазора с 2,5 см до 20 см уменьшалась на 9%, а при работе без кожуха энергоёмкость была ниже на 16...19,5%.

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

По данным В.И. Андреева [4] защитный кожух оказывает существенное влияние на динамические и технологические показатели ротационных почвообрабатывающих машин. Так, применение защитного кожуха оптимальной формы, при котором угол падения отбрасываемых почвенных частиц на внутреннюю поверхность кожуха максимален, способствует снижению величины добавочного сопротивления, создаваемого им, на 30...35%.

На рис.2.9 показан ротационный плуг РП-200, кожух которого состоит из трех частей: цилиндрической, прямого щитка и пальчатой гребенки. Гребенка способствует заделке дернины, стерневых и растительных остатков.

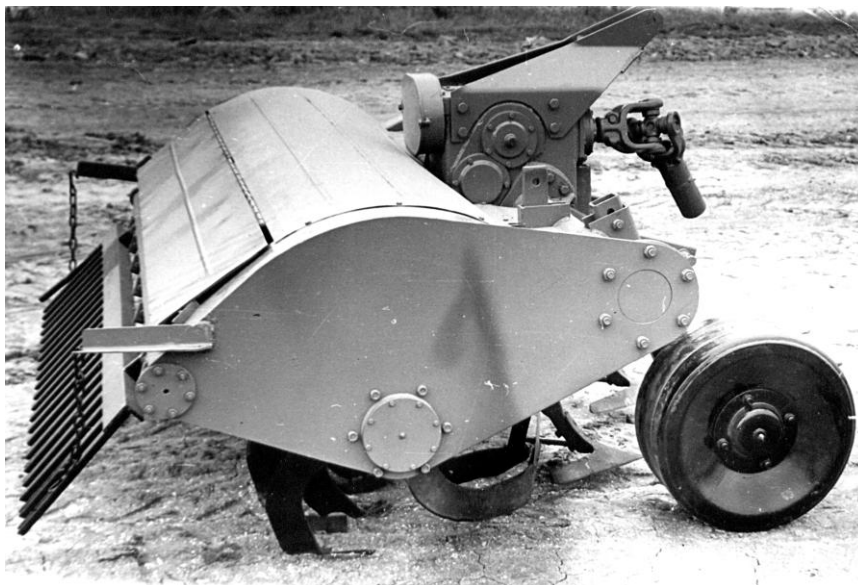


Рис. 2.9. Ротационный плуг РП-200

2.4. Силовые характеристики ротационных рабочих органов

Схема сил, действующих на ножевой барабан с горизонтальной осью вращения с Г-образными рабочими органами, показана на рис. 2.10.

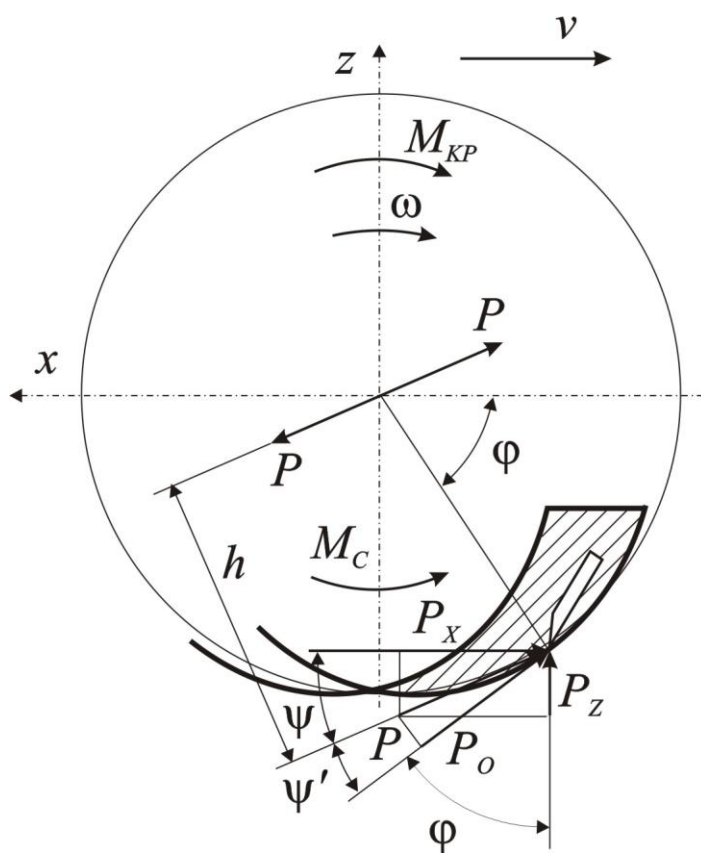


Рис. 2.10. Схема сил, действующих на ротационный рабочий орган

Примем, что равнодействующая всех элементарных сил сопротивления P отклонена от нормали к рабочей поверхности Г-образного ножа на угол трения μ_1 . Разложив силу P на горизонтальную P_X и вертикальную P_Z составляющие, получим

$$\left. \begin{aligned} P_X &= P \cos\psi = P \sin(\varphi + \psi'); \\ P_Z &= P \sin\psi = P \cos(\varphi + \psi'). \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

Из схемы следует, что при прямом вращении, т.е. сверху вниз, горизонтальная составляющая P_X направлена в ту же сторону, что и поступательная скорость машины v , а вертикальная составляющая P_Z снизу вверх, т.е. в сторону, противоположную силе тяжести машины. При обратном вращении барабана, т.е. снизу вверх, направления этих сил противоположны направлениям, показанным на рис. 2.10.

Равнодействующая сил сопротивления P создает на валу барабана момент сопротивления

$$M_C = Ph, \text{ где } h \text{ – плечо приложения силы } P.$$

Момент сопротивления M_C уравнивается приводным моментом

$$M_{KP} = P_0 R, \text{ где } P_0 \text{ – окружное усилие, а } R \text{ – радиус барабана.}$$

Зная по экспериментальным данным приводной момент M_{KP} , можно определить окружное усилие на ноже $P_0 = M_{KP} / R$.

Допуская в первом приближении, что равнодействующая сила P приложена к лезвию ножа, в соответствии со схемой рис. 2.10 найдем

$$P = P_0 \cos\psi'. \quad (2.35)$$

Тогда

$$P_X = P_0 \cos\psi \cos\psi' \text{ и } P_Z = P_0 \sin\psi \cos\psi'. \quad (2.36)$$

Для упрощения расчетов принимаем по предложению Г.Н. Синеокова [72] угол между силой P и касательной к окружности барабана, проведенной через лезвие ножа $\psi' = 15^\circ$.

Угол наклона ψ равнодействующей P в каждый данный момент определяется из соотношения

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{P_Z}{P_X} = \operatorname{arccos} \frac{P_X}{P}. \quad (2.37)$$

Из выражения (2.34) следует, что в процессе резания стружки сопротивление на нож изменяется в функции угла его поворота φ . При этом изменяется также наклон силы P . Так, если в начале резания угол ψ положителен, то в конце резания (при $\varphi > \frac{\pi}{2}$) он отрицателен.

Для приближенных расчетов по рекомендации [72] можно использовать следующие зависимости для определения составляющих усилия резания:

- при работе на твердой почве

$$P_X = 0,67P_0; \quad P_Z = -0,45P_0; \quad (2.38)$$

- при работе на мягкой почве

$$P_X = 0,88P_0; \quad P_Z = -0,6P_0; \quad (2.39)$$

При установке впереди барабана культиваторных лап - рыхлительных (рис. 2.11) или стрелчатых (рис. 1.13) следует учитывать силы их сопротивления.

Зная горизонтальную $P_X^{\text{Л}}$ и вертикальную $P_Z^{\text{Л}}$ составляющие равнодействующей сил сопротивления лап $P_{\text{Л}}$ можно учесть их в общем балансе сил, действующих на ротационную машину (рис. 2.12).

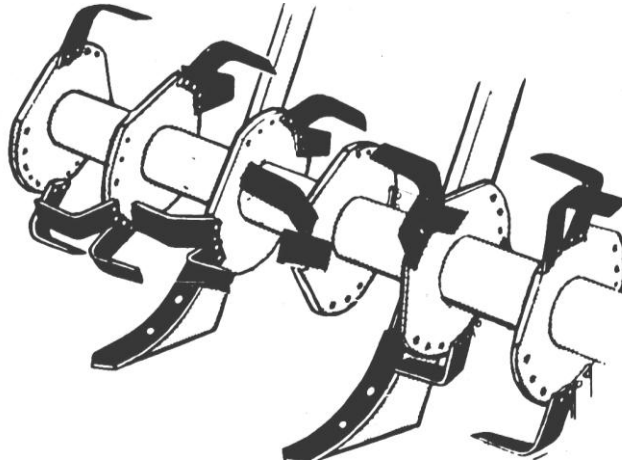


Рис. 2.11. Комбинация фрезы с рыхлительными долотообразными лапами

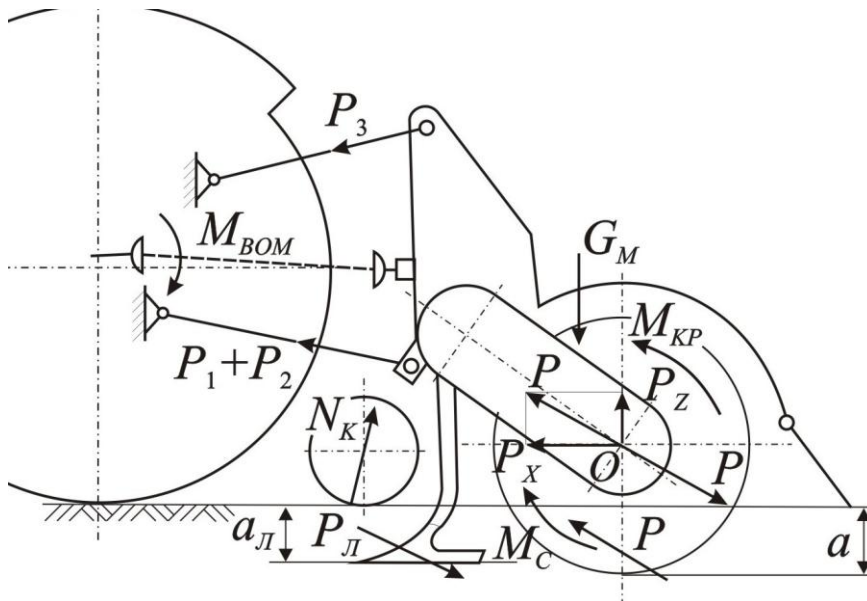


Рис. 2.12. Схема сил, действующих на ротационную почвообрабатывающую машину в комбинации с культиваторными лапами

В продольно-вертикальной плоскости на навесную ротационную почвообрабатывающую машину с горизонтальной осью вращения в комбинации с тяговыми рабочими органами действуют следующие силы:

- равнодействующая сил сопротивления на рабочих органах P ,
- сила тяжести машины G_M ,
- равнодействующая тяговых рабочих органов P_L ,
- реакция на опорных колесах N_K ,
- реакции в тягах механизма навески P_1, P_2 и P_3 .

Приведя равнодействующую сил сопротивления на ножах к оси барабана O и разложив ее на координатные оси, получим составляющие P_X и P_Z . Действие составляющей P_Z может привести к выглублению машины, если ее значение превысит силу тяжести машины G_M . Составляющая P_X направлена вперед по ходу машины и в случае, если ее величина превышает сопротивление на перекатывание машины и трактора, то отмечается ухудшение управляемости трактора.

Установка впереди или сзади барабана культиваторных лап позволяет устранить отмеченные отрицательные факторы. Равнодействующая сопротивления P_L направлена в сторону, обратную движению машины, поэтому ее горизонтальная составляющая P_X^L компенсирует излишнюю величину подталкивающей силы P_X , а вертикальная составляющая P_Z^L способствует удержанию машины на заданной глубине обработки. Кроме того, культиваторные лапы, предварительно разрыхляя почву перед барабаном, уменьшают нагрузку на ротационные ножи.

2.5. Баланс мощности МТА с комбинированной ротационной почвообрабатывающей машиной

Общие затраты мощности N_e , необходимые для работы МТА с комбинированной ротационной почвообрабатывающей машиной при установившемся режиме и на ровной поверхности поля могут быть представлены следующим выражением [59, 88]:

$$N_e = N_{ВОМ} + N_{КР} + N_{ТР} + N_f + N_{\delta}, \quad (2.40)$$

где $N_{ВОМ}$ – мощность, передаваемая через ВОМ;
 $N_{КР}$ – мощность на крюке трактора;
 $N_{ТР}$ – потери мощности в механизмах передачи и трансмиссии трактора;
 N_f – потери мощности на самопередвижение трактора;
 N_{δ} – потери мощности на буксование движителей.

На энергобаланс МТА с ротационной почвообрабатывающей машиной существенное влияние оказывает горизонтальная составляющая сопротивления резанию почвы P_x , условно называемая «толкающей силой». В зависимости от величины этой силы могут иметь место три случая:

1) Толкающее усилие $P_{КР} = P_x$ меньше сопротивления перекачиванию трактора P_f , т.е. $P_{КР} < P_f$. В этом случае к движителям трактора приложен крутящий (ведущий) момент M_K и касательная сила P_K , действующая в направлении движения трактора. При этом может иметь место буксование движителей (коэффициент буксования $\delta > 0$).

2) Толкающее усилие $P_{КР}$ равно сопротивлению перекачивания трактора P_f , т.е. $P_{КР} = P_f$. В этом случае момент на движителях M_K и касательная сила тяги P_K равны нулю, буксование отсутствует ($\delta = 0$), что приводит к снижению непроизводительных затрат энергии МТА.

3) Толкающее усилие P_{KP} превышает сопротивление P_f , т.е. $P_{KP} > P_f$. При этом движители нагружены отрицательным моментом M_K и касательная сила тяги направлена против хода трактора. Отрицательная сила тяги приводит к появлению отрицательного буксования – скольжению ($\delta < 0$). Разность мощностей N_{KP} и N_f образует избыточную мощность $N_{ИЗБ} = N_{KP} - N_f$. Часть избыточной мощности расходуется на скольжение движителей, а другая часть передается через трансмиссию трактора на привод барабана машины. Избыточная мощность циркулирует по замкнутому контуру: от движителей трактора через трансмиссию и ВОМ трактора к барабану ротационной машины, а от последней через остова машины и навеску к двигателю трактора. Подобное явление циркуляции мощности наблюдается также у тракторов с двумя ведущими мостами при их кинематическом несоответствии [82].

Циркулирующая мощность является паразитной, т.к. она не служит дополнительным источником энергии, а только нагружает трансмиссии трактора и машины, вызывая дополнительные механические потери. **Для устранения отрицательных последствий циркулирующей мощности могут служить тяговые рабочие органы, устанавливаемые перед барабаном или сзади барабана ротационной машины.**

Используя ранее выведенные формулы, определим баланс мощностей МТА с комбинированной ротационной почвообрабатывающей машиной.

Мощность $N_{ВОМ}$ расходуется на обработку почвы ($N_P + N_{ОТБ}$), на создание толкающей мощности (N_X) и преодоление потерь в приводе машины:

$$N_{ВОМ} = (N_P + N_{ОТБ} + N_X) \frac{1 - \eta_{\Pi}}{\eta_{\Pi}}, \quad (2.41)$$

где η_{II} – КПД привода ВОМ.

Для определения составляющих баланса мощности можно использовать ранее выведенные уравнения для составляющих сил сопротивления резанию P_P и P_{OTB} или принять показатель удельной работы резания k_Y [78, 95]:

$$k_Y = \frac{A_P^{y\partial}}{aBs} = \frac{kb\delta_{CP}}{Bs}, \text{ Н/м}^2, \quad (2.42)$$

где B – ширина захвата машины;
 $A_P^{y\partial}$ – удельная работа резания.

Мощность для всей машины составит

$$N_P = k_Y aBv, \text{ кВт}. \quad (2.43)$$

Удельная работа отбрасывания почвы

$$A_{OTB}^{y\partial} = \frac{A_{OTB}}{aBs} = \frac{\rho k_v^2 v_P^2}{g}.$$

Обозначив $\frac{\rho k_v^2}{g} = k_{OTB}$, получим

$$N_{OTB} = A_{OTB}^{y\partial} aBs = k_{OTB} aBv_P^2 v. \quad (2.44)$$

Приняв приближенно $v_P \approx v_0$, найдем

$$N_{OTB} = k_{OTB} aBv^3 \lambda^2, \quad (2.45)$$

где $\lambda = \frac{v}{v_0}$.

На предварительно разрыхленной почве значения k_Y и k_{OTB} должны снизиться, что может быть оценено коэффициентами:

$$\eta_Y = \frac{k_{Y \text{ на плотной почве}}}{k_{Y \text{ на разрыхленной почве}}} \cdot 100\% \quad (2.46)$$

и

$$\eta_{OTB} = \frac{k_{OTB \text{ на плотной почве}}}{k_{OTB \text{ на разрыхленной почве}}} \cdot 100\% \quad (2.47)$$

Мощность на образование подталкивающей силы приближенно определяется из выражения

$$N_K = P_X v = P \cos \psi v. \quad (4.48)$$

Равнодействующую сил сопротивления на тяговых рабочих органах P_L можно также разложить на составляющие P_X^L и P_Z^L , тогда угол наклона равнодействующей $\beta_L = \arctg \frac{P_Z^L}{P_X^L}$. Для практических

расчетов достаточно определить коэффициент

$$m'' = \frac{P_Z^L}{P_X^L} = \operatorname{tg} \beta_L. \quad (2.49)$$

Горизонтальная составляющая силы сопротивления тяговых рабочих органов может быть определена по выражению

$$P_X^L = k' F_P^L, \quad (2.50)$$

где k' - удельное сопротивление резанию тяговыми лапами;
 F_P^L - площадь поперечного сечения почвы, разрыхляемого тяговыми лапами.

Для оценки степени рыхления почвы тяговыми лапами введем коэффициент полноты предварительного рыхления

$$k_L = \frac{F_P^L}{F}, \quad (2.51)$$

где F - площадь рыхления почвы ротационной машиной.

Площадь F_p^J может быть определена в соответствии со схемой на рис. 2.13.

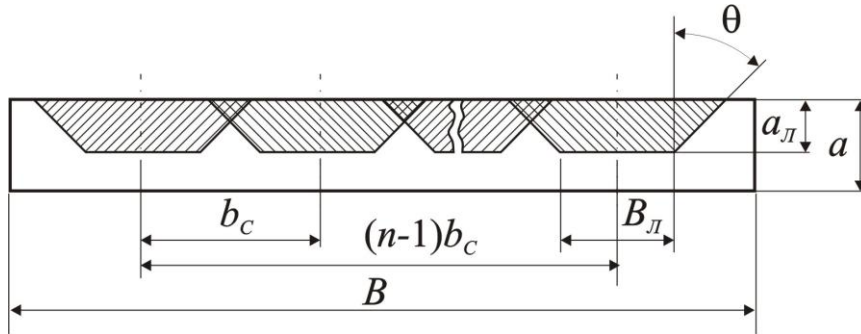


Рис. 2.13. Схема к определению полноты рыхления

Коэффициент полноты предварительного рыхления равен

$$k_{л} = \frac{4n \operatorname{tg} \theta (B_{л} a_{л} + a_{л}^2 \operatorname{tg} \theta) - (n-1)(B_{л} + 2a_{л} \operatorname{tg} \theta - b_c)^2}{4 \operatorname{tg} \theta a B}, \quad (2.52)$$

где n , $B_{л}$, $a_{л}$ – количество, ширина хода, глубина хода лап;
 b_c – ширина междуследия лап;
 θ – угол бокового скола почвы лапами.

Из последнего уравнения следует, что полнота рыхления зависит от количества, глубины хода и ширины лап, а также угла бокового скола почвы. По данным Г.Н. Синеокова угол θ изменяется в пределах $40 \dots 60^\circ$. Для приближенных расчетов можно принять $\theta \approx 45^\circ$.

Следует ожидать, что полнота рыхления будет положительно влиять на величину приводного момента $M_{кР}$ и силовые характеристики ротационной машины, а также на КПД всего МТА.

Комбинированная обработка почвы тяговыми и приводными рабочими органами позволяет потреблять энергию по двум потокам: через ВОМ трактора и прицепной крюк.

При передаче всей мощности через прицепной крюк условие движения МТА выражается уравнением [45, 47, 75]:

$$P_K = P_{KP} + G_T \mu_T + G_M \mu_M \leq G_C \mu_C, \quad (2.53)$$

где P_K – касательное усилие, развиваемое движителями трактора;
 P_{KP} – усилие на крюке трактора;
 G_T и G_M – силы тяжести трактора и машины;
 G_C – сцепной вес трактора;
 μ_T и μ_M – коэффициенты сопротивления качению трактора и машины;
 μ_C – коэффициент сцепления движителей трактора с почвой.

Из уравнения (2.53) следует, что между усилием P_K , тяговым сопротивлением машины P_{KP} и сцепным весом трактора имеется прямая зависимость: для увеличения P_{KP} должен возрасти сцепной вес трактора G_C .

При работе трактора с комбинированной ротационной почвообрабатывающей машиной условие движения МТА можно выразить в следующем виде

$$P_K = P_{KP} - P_{ПОД} + G_T \mu_T + G_M \mu_M \leq G_C \mu_C. \quad (2.54)$$

Из этого следует, что усилие на крюке трактора будет меньше, чем в первом случае (2.53), на величину $P_{ПОД}$. Очевидно, что в данном случае и необходимый сцепной вес трактора может быть также меньше.

При условии $P_{ПОД} = P_{KP} + G_T \mu_T + G_M \mu_M$ касательная сила тяги $P_K = 0$ и движение МТА будет осуществляться за счет $P_{ПОД}$. Однако движение в данном случае будет неустойчивым, т.к. силы $P_{ПОД}$ и P_{KP} в процессе работы будут непрерывно изменяться по величине.

В случае $P_{ПОД} > P_{KP} + G_T \mu_T + G_M \mu_M$ движение агрегата будет также неустойчивым по тем же причинам. Кроме того, в системе приводов

«трактор – машина» будет циркулировать мощность, и создавать дополнительные механические потери.

Все сказанное позволяет сформулировать вторую рабочую гипотезу: *«Оптимальные затраты энергии на работу МТА с комбинированной почвообрабатывающей машиной с тяговыми и приводными рабочими органами можно достичь, если подталкивающая реакция ротационной машины будет равна сумме сопротивлений качению трактора и машины»*, т.е.

$$P_{\text{ПОД}} = G_T \mu_T + G_M \mu_M. \quad (2.55)$$

При условии выполнения равенства (2.55) будет соблюдаться кинематическое соответствие системы привода «трактор – машина» и непроизводительные затраты мощности сведены к минимуму.

Для почвообрабатывающих машин с тяговыми и приводными рабочими органами суммарная потребляемая мощность складывается из следующих составляющих [52]:

$$N = N_{\text{ПЕР}} + N_P^{\text{ПР}} + N_{\text{ОТБ}}^T + N_{\text{ОТБ}}^{\text{ПР}} + N_{\text{ПОТ}}, \quad (2.56)$$

где $N_{\text{ПЕР}}$ – мощность на перемещение машины;
 N_P^T и $N_P^{\text{ПР}}$ – соответственно мощности на резание и крошение пласта тяговыми и приводными рабочими органами;
 $N_{\text{ОТБ}}^T$ и $N_{\text{ОТБ}}^{\text{ПР}}$ – соответственно мощности на отбрасывание почвы тяговыми и приводными рабочими органами;
 $N_{\text{ПОТ}}$ – потери мощности в передачах машины.

Определим перечисленные составляющие баланса мощности для трех видов передачи энергии от двигателя трактора: через прицепной крюк, через ВОМ и комбинированный – одновременно через крюк и ВОМ.

Мощность на перемещение машины равна

$$N_{\text{ПЕР}} = \mu_k Q_Z v, \quad (2.57)$$

где μ_k – коэффициент сопротивления перекатыванию опорных колес;

Q_Z – вертикальная нагрузка на опорные колеса; v – рабочая скорость машины.

Для определения нагрузки Q_Z следует использовать уравнение равновесия машины в продольно-вертикальной плоскости с учетом всех действующих сил. Приблизительно эта сила равна

$$Q_Z = G_M \pm \sum_{i=1}^n P_{Z_i}, \quad (2.58)$$

где P_{Z_i} – вертикальные составляющие сил сопротивления ротационных и тяговых рабочих органов.

2.6. Коэффициент полезного действия МТА с комбинированной ротационной почвообрабатывающей машиной

Наиболее полное определение КПД МТА дают М.Е. Мацепуро и В.В. Кацыгин [44]: полный КПД агрегата равен отношению используемой в машине агротехнически полезной мощности к эффективной мощности двигателя трактора, или произведению КПД трактора и машины. Что можно записать так

$$\eta = \frac{N_{\text{агр. М}}}{N_{e \text{ Т}}} = \frac{N_{\text{Т}}}{N_e} \cdot \frac{N_{\text{агр}}}{N_{\text{ОБЩ}}} = \eta_{\text{Тр}} \eta_{\text{М}}. \quad (2.59)$$

Агротехнически полезная мощность равна сумме тяговой и ротационной агротехнически полезных мощностей, т.е.

$$N_{\text{агр}} = N_{\text{агр}}^{\text{Т}} + N_{\text{агр}}^{\text{ПП}}. \text{ Если обозначить } \xi = \frac{N_{\text{агр}}^{\text{ПП}}}{N_{\text{агр}}}, \text{ тогда } N_{\text{агр}}^{\text{ПП}} = \xi N_{\text{агр}},$$

$$\text{а } N_{\text{агр}}^{\text{Т}} = (1 - \xi) N_{\text{агр}}.$$

Коэффициент ξ изменяется в диапазоне от 0 до 1. Если в составе МТА только тяговые рабочие органы, то $\xi = 0$, если только ротационные – $\xi = 1$.

По предложению Б.С. Свирщевского [75]

$$\eta_{TP} = \frac{N_{TЯГ} + N_{РОТ}}{N_e} = \eta_{TЯГ}(1 - \eta_{РОТ})\eta_{ВОМ}, \quad (2.60)$$

где $\eta_{РОТ} = \frac{N_{ВОМ}}{N_e}$ – коэффициент использования эффективной

мощности на привод ротационных рабочих органов;

$\eta_{ВОМ}$ – КПД передачи ВОМ.

Тяговый КПД равен

$$\eta_{TЯГ} = \eta_f \eta_\delta, \quad (2.61)$$

где η_f , η_δ – КПД учитывающие потери мощности на самопередвижение и буксование трактора.

$$\eta_\delta = 1 - \delta, \quad (2.62)$$

где δ – коэффициент буксования.

$$\eta_T = \frac{P_{KP}}{P_K} = 1 - \frac{P_f}{P_K}. \quad (2.63)$$

Примем, что агротехнически полезная мощность равна $N_{азр} = N_P + N_{ОТБ}$, тогда, после подстановок и преобразований, получим:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{N_P + N_{ОТБ}}{N_P + N_{ОТБ} + N_X + \frac{N_f - N_X}{\eta_{TP}\eta_\delta}} = \\ &= \frac{N_P + N_{ОТБ}}{N_P + N_{ОТБ} + P \cos\psi v + \frac{[G_T \mu_T + (G_M + P \sin\psi) \mu_M - P_X \cos\psi] v}{\eta_{TP}\eta_\delta}}. \end{aligned} \quad (2.64)$$

Проведем анализ влияния мощности N_X на величину КПД МТА. Для упрощения рассуждений примем, что агротехнически полезная мощность остается постоянной, т.е. $N_P + N_{ОГБ} = \text{const}$.

Рассмотрим следующие варианты [55]:

1) Наиболее значимый вариант, когда мощность N_X равна сумме мощностей $N_f^T + N_f^M$ расходуемых на передвижение трактора и машины. КПД МТА при этом имеет вид

$$\eta = \frac{N_P + N_{ОГБ}}{(N_P + N_{ОГБ} + N_X) \frac{1}{\eta_{ВОМ} \eta_{П}}}, \quad (2.65)$$

где $\eta_{П}$ – КПД передачи машины.

Непроизводительный расход мощности $N_{Н1}$ в этом случае равен:

$$N_{Н1} = (N_P + N_{ОГБ}) \left(\frac{1}{\eta_{ВОМ} \eta_{П}} - 1 \right) + \frac{N_X}{\eta_{ВОМ} \eta_{П}}. \quad (2.66)$$

2) Мощность N'_X – превышает сумму мощностей $N_f^T + N_f^M$ на величину ΔN_X , т.е. $N'_X = N_X + \Delta N_X$. При этом происходит описанное выше явление «циркуляции мощности» и КПД МТА будет равен:

$$\eta = \frac{N_P + N_{ОГБ}}{\frac{N_P + N_{ОГБ} + N_X}{\eta_{ВОМ} \eta_{П}} + (N_f^T + N_f^M - N_X) \eta_{ТР} \eta_{\delta}}, \quad (2.67)$$

Непроизводительный расход мощности в этом случае составит

$$N_{Н2} = (N_P + N_{ОГБ}) \left(\frac{1}{\eta_{ВОМ} \eta_{П}} - 1 \right) + \frac{N_X + \Delta N_X}{\eta_{ВОМ} \eta_{П}} - \Delta N_X \eta_{ТР} \eta_{\delta} =$$

$$(N_P + N_{ОГБ}) \left(\frac{1}{\eta_{ВОМ} \eta_{П}} - 1 \right) + \frac{N_X}{\eta_{ВОМ} \eta_{П}} - \Delta N_X \eta_{ТР} \eta_{\delta}. \quad (2.68)$$

Из этого уравнения следует, что $\frac{\Delta N_X}{\eta_{ВОМ}\eta_{П}} > \Delta N_X \eta_{ТР}\eta_{\delta}$, т.к.

$\eta_{ВОМ}\eta_{П}$ и $\eta_{ТР}\eta_{\delta}$ меньше 1. Следовательно, $N_{Н2} > N_{Н1}$ и $\eta_2 < \eta_1$.

3) Мощность N'_X меньше суммы мощностей $N_f^T + N_f^M$ на величину ΔN_X , т.е. $N'_X = N_X - \Delta N_X$. В этом случае непроизводительный расход мощности равен

$$N_{Н3} = (N_P + N_{ОТБ}) \left(\frac{1}{\eta_{ВОМ}\eta_{П}} - 1 \right) + \frac{N_X}{\eta_{ВОМ}\eta_{П}} - \frac{\Delta N_X}{\eta_{ВОМ}\eta_{П}} + \frac{\Delta N_X}{\eta_{ТР}\eta_{\delta}}. \quad (2.69)$$

Тракторы типа МТЗ-80, МТЗ-100, Т-150К при агрегатировании с ротационными почвообрабатывающими машинами (ротационные плуги, полевые и болотные фрезы) имеют трансмиссии с 4-5 кинематическими парами, поэтому с некоторым приближением можно считать $\eta_{ТР} \approx \eta_{П}$. Следовательно, при отсутствии буксования ($\delta = 0$) и $\eta_{\delta} = 1$ непроизводительная мощность $N_{Н3}$ в сравнении с $N_{Н1}$ уменьшится и $\eta_3 < \eta_1$. Преимущество сохранится до того момента, пока будет выполняться условие $\eta_{\delta} \leq \eta_{ВОМ}$, т.е. пока $\delta < 1 - \eta_{ВОМ}$.

4) При работе ротационной машины в комбинации с лапами к агротехнически полезной мощности наряду с N'_P и $N'_{ОТБ}$ необходимо причислить и мощность N'_X . Тогда КПД МТА будет равен

$$\eta = \frac{N'_P + N'_{ОГБ} + N'_X}{N'_P + N'_{ОГБ} + N'_X} + \frac{N_f^T + N_f^M + N_X^J - N'_X}{\eta_{ТР}\eta_\delta} = \quad (2.70)$$

$$= \frac{N'_P + N'_{ОГБ} + N'_X}{N_P + N_{ОГБ} + P \cos \psi v + \frac{[G_T \mu_T + (G_M - P \sin \psi + P_Z^J) \mu_M + P_X^J - P_X \cos \psi] v}{\eta_{ТР}\eta_\delta}}.$$

Непроизводительные затраты мощности будут равны

$$N_{H4} = (N'_P + N'_{ОГБ}) \left(\frac{1}{\eta_{ВОМ}\eta_\Pi} - 1 \right) + \frac{N'_X}{\eta_{ВОМ}\eta_\Pi} + N_X^J \left(\frac{1}{\eta_{ТР}\eta_\delta} - 1 \right) +$$

$$+ \frac{N_f^T + N_f^M - N'_X}{\eta_{ТР}\eta_\delta} = (N'_P + N'_{ОГБ}) \left(\frac{1}{\eta_{ВОМ}\eta_\Pi} - 1 \right) + N_X^J \left(\frac{1}{\eta_{ТР}\eta_\delta} - 1 \right) +$$

$$+ \frac{N'_X}{\eta_{ВОМ}\eta_\Pi} + \frac{N_f^T + N_f^M}{\eta_{ТР}\eta_\delta} - \frac{N'_X}{\eta_{ТР}\eta_\delta}. \quad (2.71)$$

Примем, что на обработку почвы расходуется постоянная мощность, т.е. $N'_P + N'_{ОГБ} + N'_X = N_P - N_{ОГБ} = \text{const}$. Тогда представим уравнение (2.71) в следующем виде

$$N_{H4} = (N'_P + N'_{ОГБ}) \left(\frac{1}{\eta_{ВОМ}\eta_\Pi} - 1 \right) + N_X^J \left(\frac{1}{\eta_{ТР}\eta_\delta} - 1 \right) + \frac{N_X - \Delta N_X}{\eta_{ВОМ}\eta_\delta} +$$

$$+ \frac{N_f^T + N_f^M - N'_X}{\eta_{ТР}\eta_\delta}. \quad (2.72)$$

С учетом условия $\eta_{ТР} \approx \eta_\Pi$ непроизводительные затраты мощности N_{H4} также как N_{H3} при $\delta = 0$ уменьшатся в сравнении с N_{H1} и, следовательно, $\eta_4 > \eta_1$. Преимущество повышения КПД сохранится при $\delta < 1 - \eta_{ВОМ}$.

На рис. 2.14 показано изменение КПД МТА в зависимости от соотношения мощностей N_K и $N_f^C = N_{ПЕР} + N_f^T$, а также коэффициента буксования.

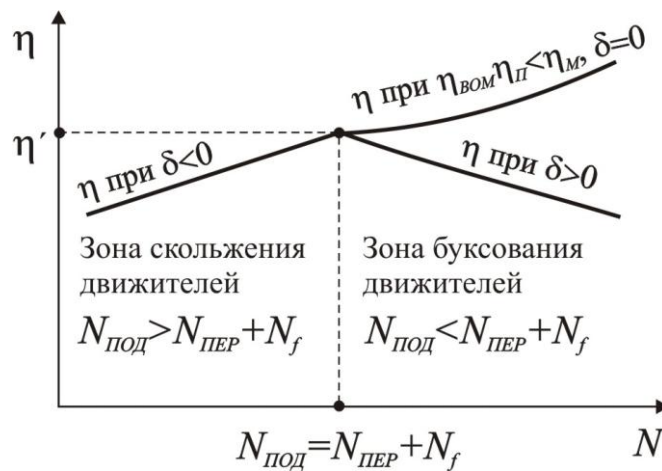


Рис. 2.14. Зависимость КПД МТА η от соотношения мощностей $N_{ПОД}$, $N_{ПЕР}$ и N_f и коэффициента буксования δ

Приведенный анализ имеет приближенный характер, т.к. при установке тяговых лап впереди (сзади) барабана может произойти изменение величины мощности, расходуемой непосредственно на обработку почвы, т.е. $N'_P + N'_{ОТБ} \pm N'_X \neq N_P + N_{ОТБ}$.

Из графика на рис. 2.14 следует, что соотношение мощностей $N_{ПОД}$ и $N_{ПЕР} + N_f^T$ существенным образом влияет на величину КПД агрегата, работающего с комбинированной ротационной почвообрабатывающей машиной. Ошибочным является мнение, что наличие толкающей силы P_X само по себе повышает эффективность использования мощности МТА: минимальные потери мощности имеют

место при такой величине P_x , когда буксование движителей трактора вовсе нет или величина его весьма незначительна.

Проведенный анализ показал, **что только путем установки тяговых рабочих органов можно существенно изменить баланс мощности МТА с ротационной почвообрабатывающей машиной и повысить его КПД.**

С целью проверки теоретических положений и рабочей гипотезы необходимо провести экспериментальные исследования в лабораторных и полевых условиях.

Глава 3. Анализ силовых и энергетических показателей ротационных комбинированных почвообрабатывающих машин

3.1. Лабораторные исследования

Важной силовой характеристикой ротационных почвообрабатывающих машин является крутящий момент M_{KP} , необходимый для привода ножевого барабана [12]. Для определения величины $M_{KP} = f(\varphi)$ проводились опыты в лабораторных условиях на установке ЛУ, представляющей собой сочетание небольшого почвенного канала и передвижной тележки с ротационными рабочими органами (рис. 3.1) [1].

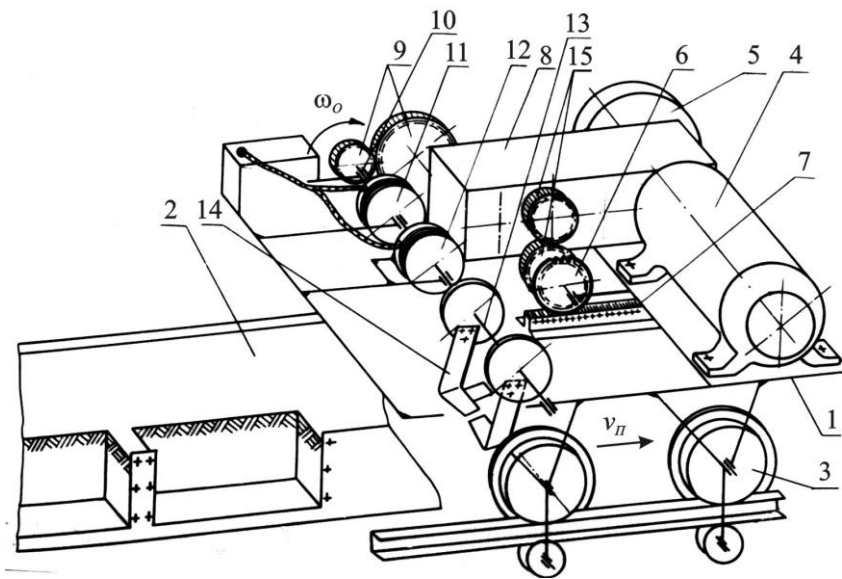


Рис. 3.1. Лабораторная установка для определения крутящего момента M_{KP}

На раме передвижной тележки 1 установлены все основные узлы и приборы. Тележка на колесах с ребордами 3 передвигается по направляющим швеллерам. Перемещение тележки и вращение вала 10 с рабочими органами 14 осуществляется от двигателя постоянного тока 4, питание к которому подводится через подвесной кабель. Крутящий момент электродвигателя передается на редуктор 8. От редуктора через сменные шестерни 9 вращение передается на вал привода 10 и через пару цилиндрических шестерен 15 на ведущую звездочку 6 цевочного зацепления 7.

При одновременном вращении вала 13 с рабочими органами и поступательном перемещении тележки осуществляется процесс ротационного резания почвы, находящейся в почвенном канале 2.

На установке можно осуществлять процессы единичного отрезания стружки, отрезания заданного числа стружек и непрерывную работу на заданном пути. Это достигается тем, что установка снабжена двумя электромагнитными муфтами, производящими пуск и торможение рабочего органа. Также имеются путевые выключатели, управляющие работой электромагнитных муфт, расположенные вдоль движения тележки на регулируемом расстоянии, кратном одной или нескольким подачам на нож.

Установка работает следующим образом. В начале движения тележки вал 13 находится в положении, при котором нож 14 расположен над поверхностью почвы. При касании упора одного из выключателей отключается тормозная муфта и включается пусковая муфта. Вал 13 начинает вращаться, и рабочий орган отрезает одну или несколько стружек, в зависимости от расстояния между выключателями.

На рис. 3.2 показана лабораторная установка ЛУ с оборудованием для скоростной киносъемки в почвенном канале.

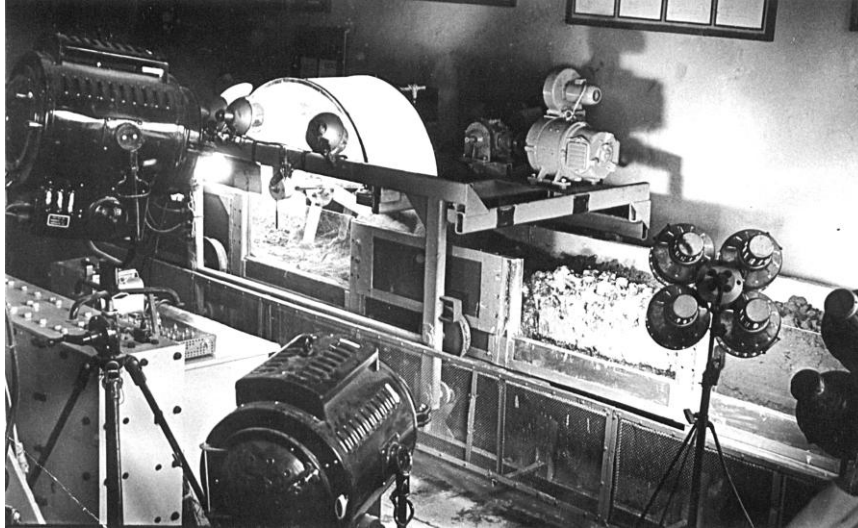


Рис. 3.2. Установка для скоростной киносъемки процесса ротационной обработки почвы в почвенном канале

Опыты были проведены на плотной почве, на предварительно взрыхленной и на переувлажненной почве. Скоростная киносъемка производилась для двух серий опытов. Первая серия предусматривала многократное отрезание стружек. Во второй серии опытов изучался процесс единичного отрезания стружки, т.е. без поступательного движения тележки. Отрезание стружки в этом случае производилось одним Г-образным ножом по окружности, а не по циклоиде. При этом горизонтальная полка ножа была обращена в сторону открытой стенки борозды.

Анализ полученных кинограмм показывает, что процесс деформации почвы ротационными ножами на скорости резания от 0,5 м/с до 6 м/с во многом подобен процессу деформации почвы поступательно движущимся клинообразным рабочим органом. Воздействие на почву

ротационным ножом может быть условно разделено на отдельные фазы: деформация, отрыв (сдвиг) и отбрасывание стружки. В первой фазе при внедрении лезвия ножа на 20...30 мм в почве создается сложное напряженное состояние. Вторая фаза начинается с образования впереди ножа опережающей трещины, которая развивается в направлении абсолютной скорости движения ножа. Трещина расширяется, искривляется и выходит на поверхность борозды, образованной ножом. Далее происходит отрыв части стружки от монолита и ее контакт с ножом прерывается. Третья фаза начинается с момента отрыва части стружки от ножа и происходит полет или отброс раздробленной стружки. При дальнейшем движении нож отрывает и отбрасывает последующие элементы стружки до полного отрезания всей стружки. Длина отрезанных элементов по мере поворота ножа уменьшается, что связано с уменьшением толщины стружки. Сокращение длины элементов наблюдается также с уменьшением подачи и увеличением скорости резания. По нашим наблюдениям основным видом деформации при отрезании стружки в плотной почве является отрыв, что согласуется с известными работами [11, 13].

Увеличение скорости резания свыше 6 м/с приводит к резкому изменению процесса резания: впереди ножа образуется не одна, а система трещин, что соответствует модели радиального расширения пласта. Процесс трещинообразования происходит более интенсивно, что свидетельствует о преобладании хрупкого вида разрушения почвы с признаками ударного разрушения [6].

Процесс взаимодействия ротационного ножа с предварительно взрыхленной почвой отличается от описанного выше: впереди ножа не наблюдается образование опережающей трещины. В этом случае происходит только сдвиг почвенной стружки.

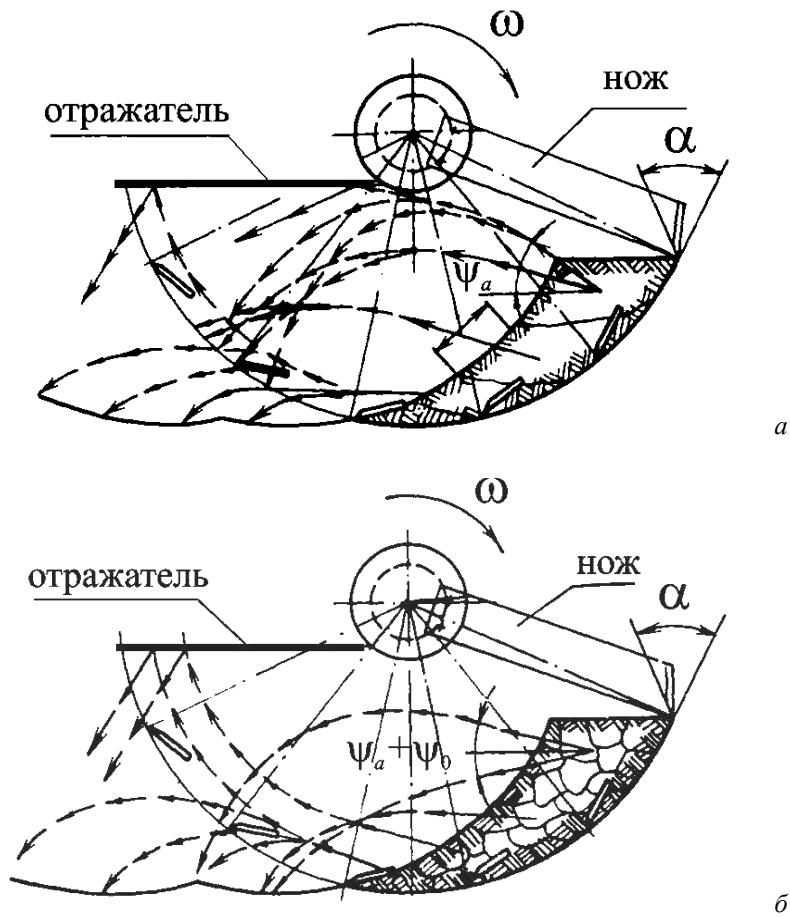


Рис. 3.3. Схема траекторий движения отбрасываемых ножом комков почвы:
 а – на плотной почве; б – на предварительно разрыхленной почве

При обработке кинограмм были получены траектории полета отброшенных комков почвы. На рис. 3.3 показаны схемы типичных траекторий полета комков плотной и разрыхленной почвы. Из этих схем следует, что на разрыхленной почве значительно изменяется траектория

отбрасываемых комков. При резании рыхлой почвы направление абсолютной скорости v_a отбрасывания почвы близко или совпадает с нормалью к поверхности крыла ножа. При резании плотной почвы, когда влияние подпора неотрезанной части стружки велико, направление скорости v_a отклонено от нормали назад.

Из схем на рис. 3.3 следует, что при резании плотной почвы верхняя часть стружки, составляющая около 30% всего объема отрезаемой почвы, отбрасывается под углом $\psi_a = 10...30^\circ$. Нижняя часть стружки отбрасывается под углом $\psi_a = 5...10^\circ$. Это приводит к тому, что отброшенная на дно борозды почва повторно взаимодействует с последующими ножами. При этом почва дополнительно крошится, упорядоченность укладки пластов нарушается, а энергоемкость обработки почвы возрастает.

На предварительно разрыхленной почве верхняя часть стружки отбрасывается под углом $\psi_a = 5...10^\circ$, поэтому большая часть отброшенной почвы избегает повторного взаимодействия с последующими ножами.

Анализ траекторий движения отброшенной почвы показывает, что кожух с отражателем должны перекрывать пространство после барабана вплоть до вала, т.к. почва отбрасывается и вперед. Эффективность кожуха особенно возрастает при резании предварительно разрыхленной почвы.

При анализе была также определена абсолютная скорость отброшенной почвы v_a и коэффициент k_v . Установлено, что большая часть почвенной стружки (80...90% при резании как плотной, так и разрыхленной почвы) приобретает скорость v_a значительно меньше, чем скорость резания v_p . Это в основном почва верхней части стружки. График зависимости скорости v_a от скорости v_p при разных углах резания α приведен на рис. 3.4.

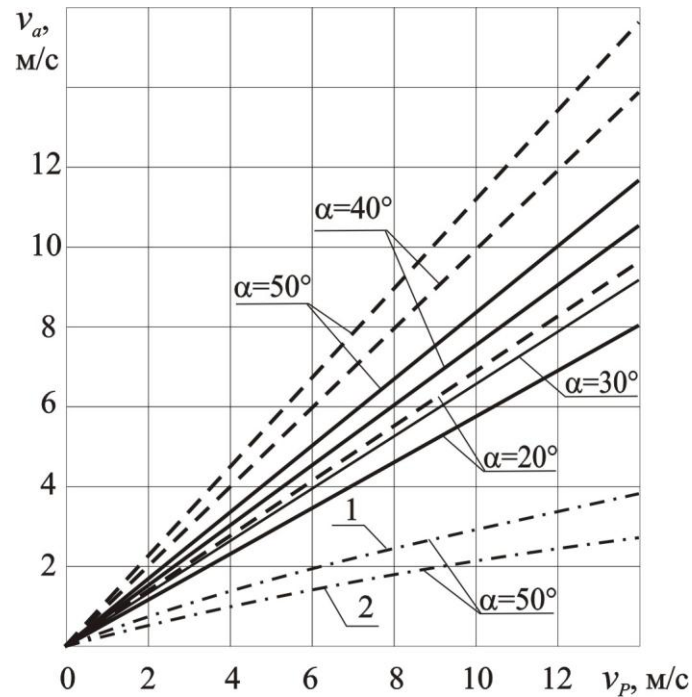


Рис. 3.4. Зависимость абсолютной скорости отбрасывания почвы v_a от скорости резания v_p при разных углах резания ножа α :
 ----- $k_B = 0$; ————— $k_B = 0,4$ (расчет);
 1 – плотная почва; 2 – разрыхленная почва (эксперимент)

Из графика на рис. 3.4 следует, что предварительное рыхление почвы снижает величину скорости v_a и, соответственно, коэффициента k_V на 27...30%. Скорость v_a , полученная экспериментально имеет ту же закономерность, что и расчетная. Разница в их абсолютных значениях объясняется тем, что в расчетах не учтен подпор со стороны неотрезанной части стружки, а также то, что с ножом взаимодействует не материальная точка, а слой почвы. При отрезании нижней части стружки, когда подпор

уменьшается, из-за малой толщины стружки, расчетные и экспериментальные значения скорости v_a близки.

Таким образом, лабораторные исследования подтвердили теоретические предположения и рабочую гипотезу о положительном влиянии предварительного рыхления почвы на величину абсолютной скорости отбрасывания стружки и снижение энергозатрат.

3.2. Полевые исследования

Сопrotивление ротационных рабочих органов плуга типа ПР определяли на полевой установке УДР (рис. 3.5 и 3.6).

Схема работы ротационного плуга типа ПР показана на рис. 3.7.

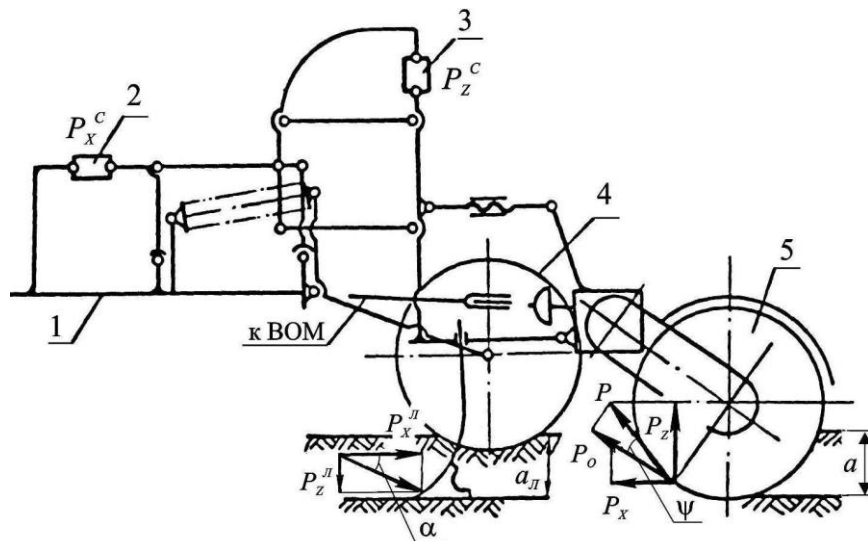
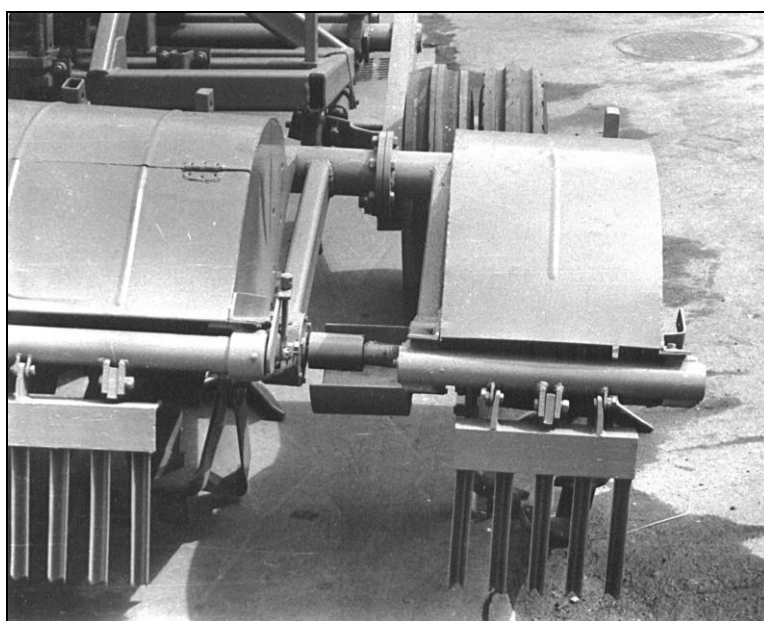


Рис. 3.5. Схема полевой установки УДР для определения силовых характеристик рабочих органов:

1 – рама; 2 – тензозвено для силы P_x^c ; 3 – тензозвено для силы P_z^c ;
4 – опорное колесо; 5 – барабан плуга



а



б

Рис. 3.6. Установка УДР:
а – общий вид; *б* – дополнительная секция ротационного плуга ПР-2

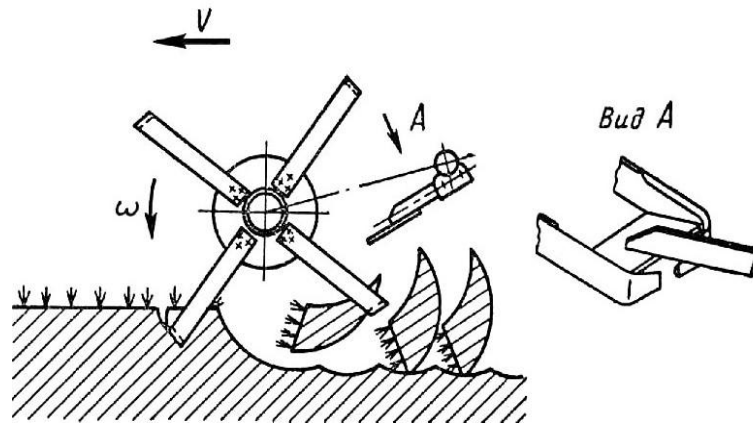


Рис. 3.7. Схема работы ротационного плуга типа ПР

В плуге типа ПР для принудительного сброса отрезанных пластов (стружек) почвы в зазоре между двумя Г-образными ножами, закрепленными на валу барабана попарно горизонтальными полками навстречу друг другу, установлены отражатели (вид А на рис. 3.7). Установка отражателей позволила значительно увеличить скоростной режим λ работы ротационного плуга. Аналогичное устройство с принудительным сбросом стружки использовано на всех модификациях ротационных плугов (ПР- 200, ПР-2,7, ПР-4).

Установка УДР состоит из двух рам: основной и дополнительной. Основная рама присоединяется к прицепному устройству трактора. На дополнительную раму навешивался ротационный плуг ПР-2 с помощью механизма навески, который позволял устанавливать разную глубину обработки плугом. На основную раму могли устанавливаться две культиваторные лапы. С правой стороны ротационного плуга крепилась дополнительная ротационная ножевая измерительная секция с четырьмя парами Г-образных ножей шириной захвата 260 мм (рис. 3.8).

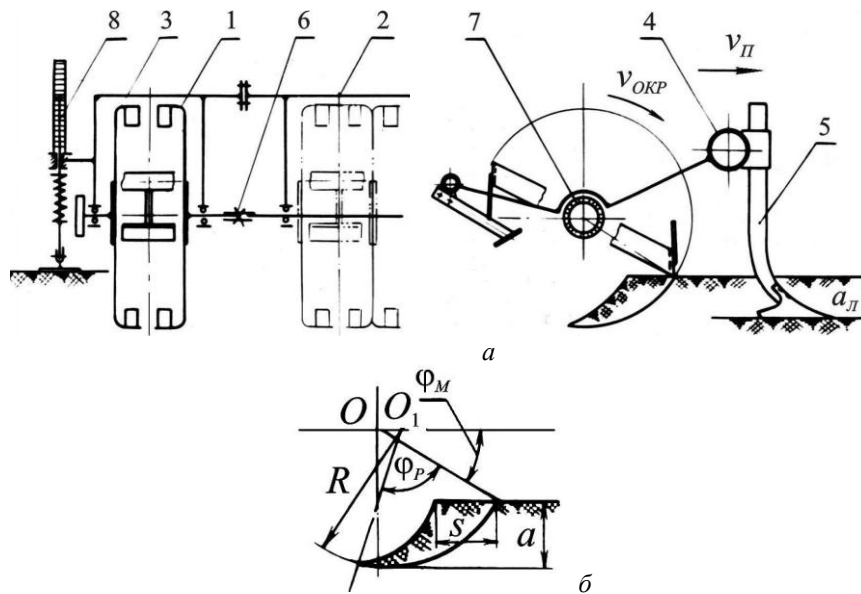
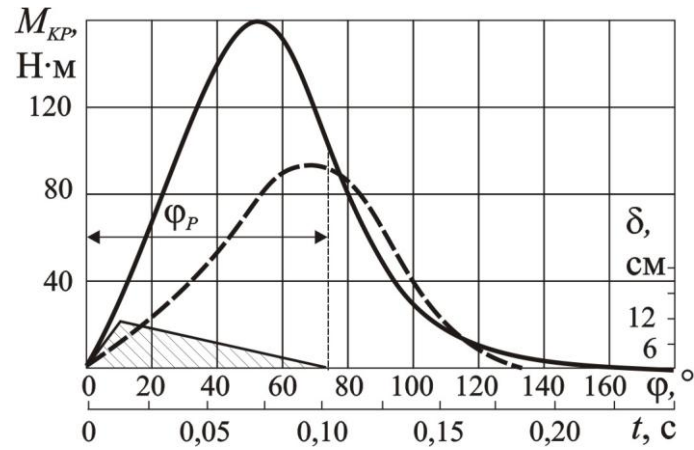


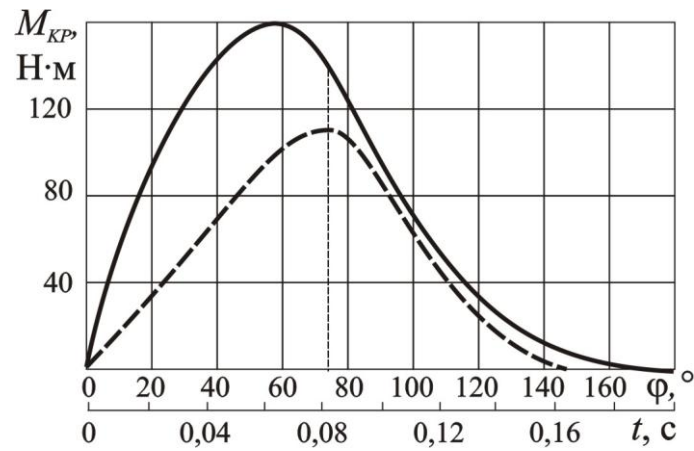
Рис. 3.8. Схема дополнительной секции плуга ПР-2: *а* – расположение измерительных элементов; *б* – измерение углов контакта ножей с почвой

Валы ротационной секции и плуга соединялись тензометрической втулкой 6, регистрирующей крутящий момент, передаваемый на секцию. На выходном валу ротационной секции с правой стороны устанавливался потенциометр 7, позволяющий фиксировать угол поворота φ вала с рабочими органами. С полевой стороны на раме плуга крепится реохордный глубиномер 8, производящий непрерывную запись глубины хода плуга и, соответственно, секции. На секции впереди могла устанавливаться культиваторная стрелчатая лапа 5. Рама ротационного плуга 1 крепилась к основной раме с помощью параллелограммного механизма, в рычаги которого были встроены тензозвенья 7 и 8, с помощью которых определялись горизонтальные и вертикальные составляющие P_X и P_Z сопротивления плуга и $P_X^Л$ и $P_Z^Л$ сопротивления стрелчатых культиваторных лап.

На рис. 3.9 показана диаграмма изменения крутящего момента M_{KP} ножевой ротационной секции в зависимости от угла поворота φ .



a



б

Рис. 3.9. Изменение крутящего момента M_{KP} ножевой секции:
 — на плотной почве; - - - на разрыхленной почве;
a — при $v_P = 5$ м/с; *б* — при $v_P = 7$ м/с

Из графиков рис. 3.9 следует, что с начала врезания ножа в почву наблюдается интенсивный рост M_{KP} , особенно на плотной почве. Максимальное значение крутящего момента наступает при угле поворота $\varphi = 50^\circ$. Следует учитывать, что значение крутящего момента получено в условиях блокированного резания, т.е. при отсутствии влияния соседних ножевых секций. На этом же рисунке изображен график (заштрихованный треугольник) изменения толщины отрезаемой стружки δ , из которого видно, что максимум M_{KP} не совпадает с максимальной толщиной стружки. Подобное было отмечено в опытах А.Д. Далина, в которых разница между $M_{KP\max}$ и δ_{\max} составляла 20° . В наших опытах эта разница составила $38...40^\circ$. Это несоответствие объясняется влиянием блокированного резания почвы в наших опытах.

Следует отметить еще одну особенность изменения M_{KP} : в момент прекращения отрезания стружки при $\varphi \approx 72^\circ$ величина M_{KP} сохраняет еще значительную величину. Нулевое значение M_{KP} достигает только при угле поворота $\varphi \approx 160^\circ$, что объясняется дополнительным взаимодействием ножа с ранее отброшенной почвой.

На рис. 3.10 представлены усредненные графики зависимости M_{KP} от угла поворота ножа φ (продолжительности резания стружки t) для трех состояний почвы при ширине захвата секции 0,30 м, глубине обработки $a = 0,15$ м, глубине установки культиваторных лап $a_L = 0,10$ м, $v_0 = 4,19$ м/с и $\lambda = 6,44$.

Зависимость M_{KP} на переувлажненной почве была получена на лабораторной установке ЛУ.

Для сравнения энергетических затрат при резании почвы в различных состояниях определили работу A_p на участке резания за время

поворота ножа на угол φ_P (см. рис. 3.7, б) и общую величину работы $A_{ОБЩ}$ за полный цикл отрезания и отбрасывания почвы (табл. 3.1).

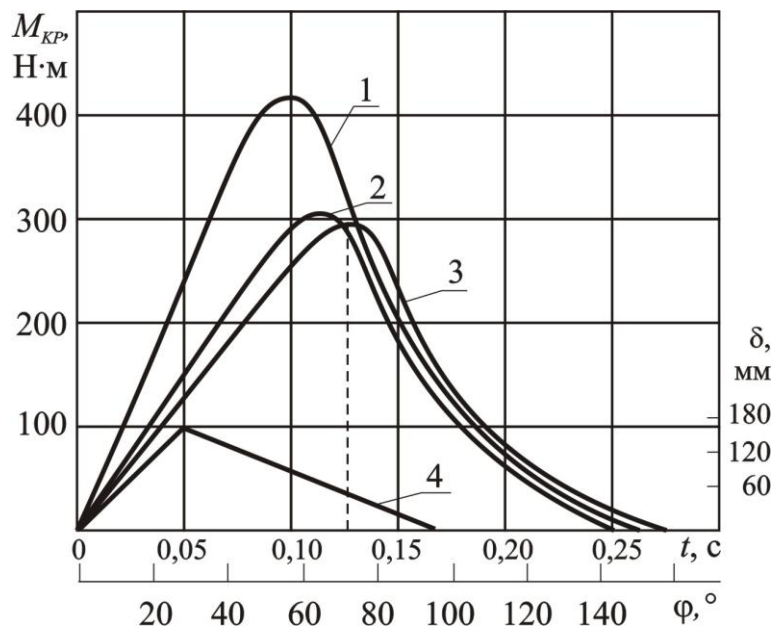


Рис. 3.10. Зависимость M_{KP} от угла поворота ножа φ или продолжительности резания стружки t :
 1 – на плотной почве; 2 – на предварительно разрыхленной почве; 3 – на переувлажненной почве; 4 – зависимость $\delta = f(\varphi)$

Значения работ определялись методом планиметрирования соответствующих участков диаграмм (см. рис. 3.10).

Из данных табл. 3.1 следует, что основная доля работы расходуется на резание стружки при повороте ножа на угол контакта $\varphi_K = \varphi_M - \varphi_P$ и составляет на плотной почве 65...75%, на предварительно разрыхленной почве 55...65% от общей работы.

Таблица 3.1

Значения A_P , $A_{ОБЩ}$ и $A_{ОБЩ} - A_P$ (лабораторные и полевые опыты), Н·м

| v_0 , м/с | Плотная почва | | | Предварительно разрыхленная почва | | | Переувлажненная почва | | |
|----------------|---------------|--------|----------------------|--------------------------------------|--------|----------------------|--------------------------|--------|----------------------|
| | $A_{ОБЩ}$ | A_P | $A_{ОБЩ}$ - A_P | $A_{ОБЩ}$ | A_P | $A_{ОБЩ}$ - A_P | $A_{ОБЩ}$ | A_P | $A_{ОБЩ}$ - A_P |
| 2,79 | 125,17 | 324,02 | 101,14 | 341,68 | 228,86 | 112,82 | 313,23 | 181,18 | 132,05 |
| 4,19 | 498,15 | 400,08 | 98,35 | 400,93 | 297,24 | 102,71 | 348,16 | 221,31 | 127,85 |
| 5,02 | 621,26 | 531,12 | 90,14 | 434,84 | 334,82 | 100,02 | 361,34 | 251,28 | 110,06 |
| 5,0* | 1650,0 | 1300,0 | 344,0 | 1030,0 | 600,3 | 377,0 | - | - | - |
| 7,0* | 2285,0 | 1460,0 | 835,0 | 1420,0 | 800,0 | 620,0 | - | - | - |

* опыты в полевых условиях

Следует отметить следующую особенность: предварительное рыхление почвы уменьшает величину $A_{ОБЩ}$ на 25...60% и увеличивает долю работы $A_{ОБЩ} - A_P$, совершаемую после завершения процесса резания стружки, на 9...13%. Последнее обстоятельство объясняется тем, что предварительно разрыхленная почва отбрасывается на меньшее расстояние, чем при резании монолита и нож при окончании отрезания стружки проходит через бóльшую толщину почвенного слоя, преодолевая соответственно бóльшее сопротивление.

Лабораторные опыты показали, что величина работы $A_{ОБЩ}$ при резании переувлажненной почвы на 14...47% меньше, чем плотной почвы и на 8...20% меньше, чем предварительно разрыхленной почвы. С увеличением скорости v_0 величины $A_{ОБЩ}$ и A_P увеличиваются для почвы во всех состояниях. Так, с увеличением скорости v_0 с 2,79 до 5,02 м/с $A_{ОБЩ}$ возрастает в 1,46 раз на плотной почве, в 1,27 раза на предварительно разрыхленной почве, и в 1,15 раза на переувлажненной почве.

Из результатов проведенных лабораторно-полевых опытов следует, что путем изменения состояния почвы имеется возможность снижения энергозатрат на ротационную обработку почвы в пределах 10...30%.

Результаты опытов подтверждают выдвинутую ранее гипотезу.

3.3. Анализ силовых характеристик ротационных и тяговых рабочих органов

К силовым характеристикам ротационных рабочих органов относятся: горизонтальная P_X и вертикальная P_Z составляющие равнодействующей P сил сопротивления, окружное усилие P_O и крутящий момент M_{KP} . При установке культиваторных лап на ротационную машину будут действовать суммарные горизонтальные $P_X^C = P_X + P_X^L$ и вертикальные $P_Z^C = P_Z + P_Z^L$ составляющие [57].

Для определения сил P_X , P_Z , P_X^L , P_Z^L , а также P_X^C и P_Z^C применялось плоскостное динамометрирование на полевой установке УДР (см. рис. 3.5). Для этого на дополнительной раме устанавливался ротационный плуг, ширина захвата которого могла изменяться в пределах 1,04...2,01 м. Впереди барабана плуга устанавливались 2-4 культиваторные стрелчатые или рыхлительные лапы.

На рис. 3.11 показана работа установки УДР.

Влияние глубины установки a_L двух стрелчатых лап шириной захвата 0,13 м каждая, а также полноты рыхления k_L на M_{KP} показано, на графиках рис. 3.12, а величины подачи s – на рис. 3.13.

Из графиков рис. 3.12 следует, что с увеличением поступательной скорости значение M_{KP} возрастает по кривой второго порядка.



Рис. 3.11. Полевая динамометрическая установка УДР

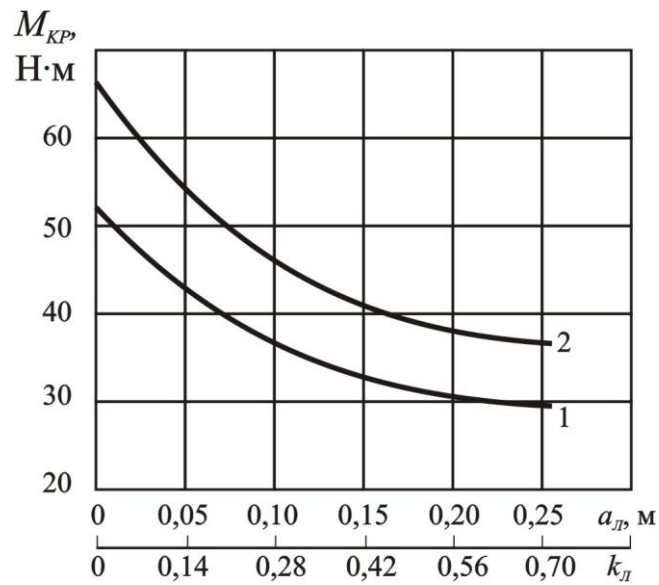


Рис. 3.12. Зависимость M_{KP} от глубины хода лап $a_{Л}$ и коэффициента $k_{Л}$ при глубине хода ротора $a = 0,27$ м, при различной поступательной скорости v :
1 – 1,2 м/с; 2 – 1,7 м/с

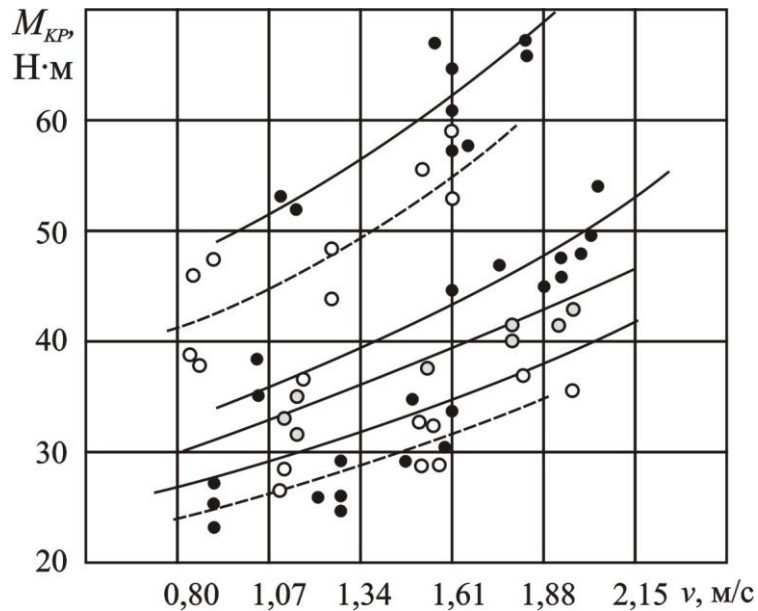


Рис. 3.13. Зависимость M_{KP} от скорости движения v при различных глубине хода лап a_L и подаче s :
 1 - $a_L = 0$; 2 - $a_L = 0,10$ м; 3 - $a_L = 0,15$ м; 4 - $a_L = 0,25$;
 ————— $s = 0,19$ м; - - - - - $s = 0,15$ м;

С увеличением глубины хода лап a_L и, соответственно, полноты рыхления k_L рост M_{KP} менее интенсивен, чем при работе без лап ($a_L = 0$).

Из графиков рис. 3.13 следует, что увеличение подачи с 0,15 м до 0,19 м приводит к росту M_{KP} на 10...15%. С увеличением глубины хода лап в пределах от 0 до 0,25 м и, соответственно, полноты рыхления от 0 до 0,93 снижение M_{KP} составило 45%. Следует отметить, что величина M_{KP} в зависимости от глубины хода лап изменяется неравномерно. В интервале $a_L = 0...0,15$ м снижение M_{KP} происходит интенсивно и составляет более 30%, а в интервале $a_L = 0,15...0,25$ м – всего лишь 6,5...7,5%.

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

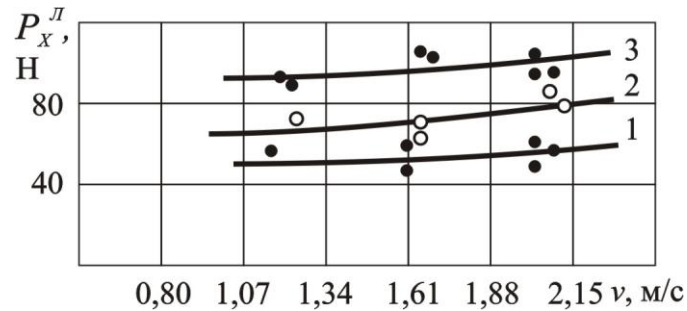
Из приведенных данных следует, что для снижения крутящего момента $M_{кр}$ в пределах 30...40% достаточно устанавливать культиваторные лапы на глубину 0,10...0,15 м с полнотой рыхления $k_p = 0,4...0,6$ [87].

На полевой установке УДР (со снятым ротационным плугом) были определены полнота рыхления (табл. 3.2) и силовые характеристики культиваторных лап (рис. 3.14).

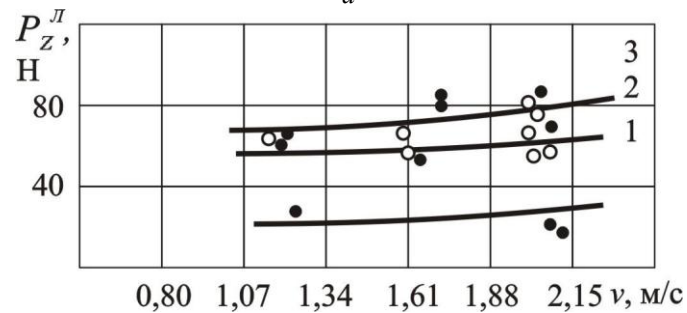
Таблица 3.2

Полнота рыхления почвы плугом типа ПР в полевых условиях

| Параметры | Тип почвы | | | | | |
|---|-----------------------------|-----------|-----------|------------------------|-----------|-----------|
| | Южный малогумусный чернозем | | | Темно-каштановая почва | | |
| Твердость почвы, МПа | 0,14...0,18 | | | 0,17...0,27 | | |
| Число лап, z_L | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| Ширина захвата лап, B_L , мм | 330 | 130 | 330 | 330 | 330 | 330 |
| Глубина хода лап, a_L , см | 15 | 15 | 20 | 15 | 20 | 23 |
| Площадь рыхления, F_p , см ² | 1500-1525 | 950-980 | 2500-2690 | - | - | - |
| Полнота рыхления, k_p | 0,60-0,61 | 0,38-0,39 | 0,89-0,93 | 0,41-0,42 | 0,63-0,64 | 0,74-0,75 |
| Глубина хода барабана, см | 27 | | | | | |
| Ширина захвата барабана, см | 104 | | | | | |



а



б

Рис.3.14. Зависимость составляющих сил сопротивления $P_X^П$ (а) и $P_Z^П$ (б) стрельчатых культиваторных лап плуга типа ПР в зависимости от поступательной скорости v , при различных значениях глубины работы $a_П$: 1 – 0,10 м; 2, 3 – 0,15 м; 1, 3 – $B_П=0,33$ м; 2 – $B_П=0,13$ м (твердость почвы 1,4...1,8 МПа, влажность 22%, $z_П=2$)

Из графиков рис. 3.14 следует, что с увеличением поступательной скорости машины величины $P_X^П$, $P_Z^П$ увеличиваются по пологой кривой. С ростом глубины хода лап в пределах 0,10...0,15 м горизонтальная составляющая $P_X^П$ увеличивается в 1,8...2,0 раза, а вертикальная составляющая $P_Z^П$ в 1,3...1,9 раза. Величины этих составляющих в значительной мере зависят от ширины захвата лап. Так, при одинаковой глубине хода ($a_П=0,15$ м) составляющая $P_X^П$ для стрельчатых лап в

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

1,3...1,4 раза, а составляющая $P_Z^{\text{Л}}$ – в 2,6...2,8 раза больше аналогичных составляющих рыхлительных долотообразных лап. Для сравнения заглубляющей способности стрелчатых и долотообразных рыхлительных лап определялся угол наклона равнодействующей $\beta_{\text{Л}} = \arctg(P_Z^{\text{Л}} / P_X^{\text{Л}})$,

коэффициент $m = \tg \beta_{\text{Л}}$ и удельное сопротивление $k = \frac{P_X^{\text{Л}}}{F} = \frac{P_X^{\text{Л}}}{a_{\text{Л}} B_{\text{Л}}}$,

где $a_{\text{Л}}$ и $B_{\text{Л}}$ – глубина хода и ширина всех лап.

Силовые характеристики культиваторных лап приведены в табл.

3.4.

Таблица 3.4

Силовые характеристики культиваторных лап

| Тип лап | Твердость почвы, МПа | Угол $\beta_{\text{Л}}$, град. | Коэффициент заглубляемости m | Удельное сопротивление, $\text{Н/см}^2 \cdot 10^{-1}$ |
|-------------------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------------------|---|
| Стрелчатые | 0,8...1,2 | 22...28 | 0,4...0,54 | 0,35...0,40 |
| Рыхлительные (долотообразные) | 1,4...1,8 | 9...12 | 0,16...0,21 | 0,72...0,84 |

Из таблицы следует, что стрелчатые лапы обладают большей заглубляющей способностью, чем рыхлительные.

На установке УДР в полевых условиях были определены суммарные составляющие горизонтальных $P_X^{\text{С}} = P_X + P_X^{\text{Л}}$ и вертикальных $P_Z^{\text{С}} = P_Z + P_Z^{\text{Л}}$ составляющих сил сопротивления, действующих на ротационные и тяговые рабочие органы.

Зависимости $P_X^{\text{С}}$ и $P_Z^{\text{С}}$ от поступательной скорости v для различной глубины хода $a_{\text{Л}}$ культиваторных лап приведены на рис. 3.15 и 3.16.

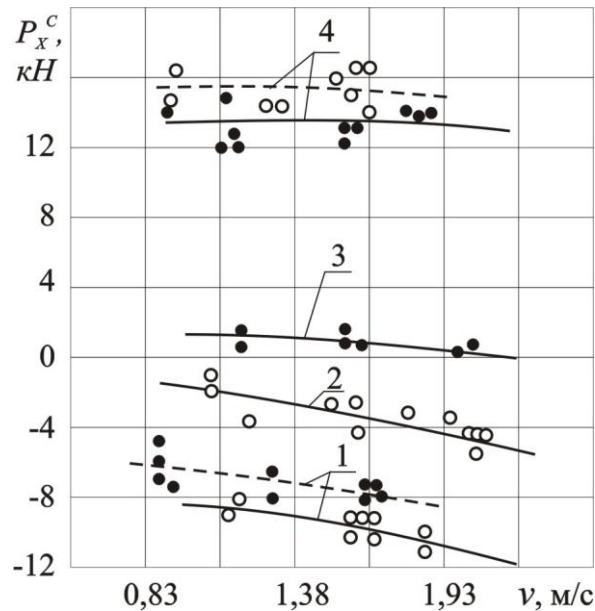


Рис. 3.15. Зависимость суммарной горизонтальной составляющей сил сопротивления от поступательной скорости ($a = 0,27$ м) при различной глубине хода a_L :

1 – 0; 2 – 0,10 м; 3 – 0,15 м; 4 – 0,20 м;

————— $s = 0,19$ м; - - - - - $s = 0,15$ м;

Из графиков следует, что в зависимости от глубины хода лап a_L можно изменить не только абсолютную величину сил P_x^C и P_z^C , но и их направление: если при $a_L = 0$ сила P_x^C направлена по ходу движения машины (P_x^C имеет знак минус), то при $a_L = 0,15 \dots 0,20$ м она меняет направление – переходит из подталкивающей в тяговую нагрузку (см. кривые 3 и 4 на рис. 3.14). Установка культиваторных лап на глубину $a_L = 0,10 \dots 0,15$ м приводит к резкому снижению выталкивающей силы P_z^C (почти на 40%). Дальнейшее увеличение a_L до 0,20 м снижает P_z^C лишь на 7,5...9,5%.

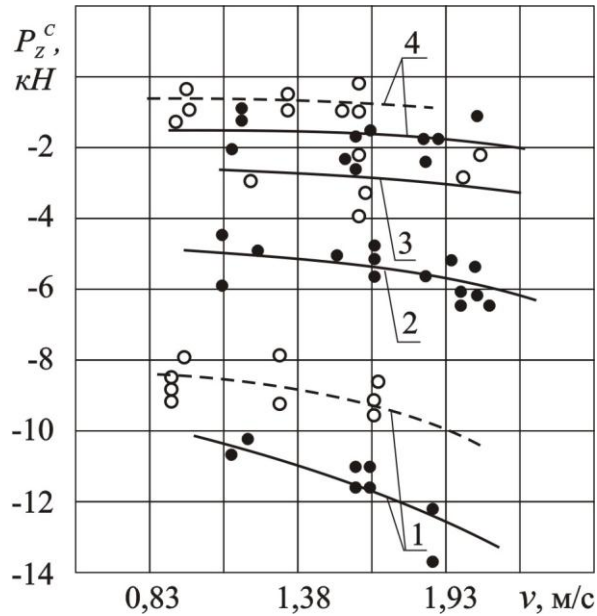


Рис. 3.16. Зависимость суммарной вертикальной составляющей сил сопротивления P от поступательной скорости ($a = 0,27$ м) при различной глубине хода лап a_L :
 1 – 0; 2 – 0,10 м; 3 – 0,15 м; 4 – 0,20 м;
 ————— $s = 0,19$ м; - - - - - $s = 0,15$ м;

Приведенные данные свидетельствуют о том, что установка культиваторных лап на глубину, примерно равную половине глубины обработки a ротационного барабана, вполне достаточно для устойчивой работы ротационной машины.

В табл. 3.5 приведены обобщенные силовые показатели ротационных рабочих органов.

Таблица 3.5

Силовые характеристики ротационных рабочих органов плуга РП-2
(тип почвы - южный малогумусовый чернозем; твердость и влажность
почвы, режим работы: $p = 0,8 \dots 1,2$ МПа, $W = 12 \dots 18\%$; $s = 0,15 \dots 0,19$ м)

| P_z/P_x | P_x/P_o | P_z/P_o | $\psi = \arctg\left(\frac{P_z}{P_x}\right)$ град. | $\psi = \arccos\left(\frac{P}{P_o}\right)$ град. |
|-------------|-------------|-------------|--|---|
| 0,87...1,3 | 0,50...0,66 | 0,60...0,8 | -(40...50) | 16...20 |
| 0,75...1,0 | 0,72...0,84 | 0,60...0,8 | -(37...45) | 21...35 |
| 0,70...0,84 | 0,85...0,95 | 0,65...0,73 | -(35...40) | 10...25 |

Величины углов ψ наклона равнодействующей сил сопротивления, полученные для ротационного плуга, в достаточной степени согласуются с данными В.С. Сурилова [78], Н. Bernacki [95], Е.П. Яцука [91] и другими, полученными для легких и средних почвообрабатывающих фрез.

Бóльшие значения угла ψ получены при работе плуга без культиваторных лап. Уменьшение подачи s с 0,15...0,19 м до 0,10 м ведет к незначительному снижению угла ψ на 2...5°.

Величина угла ψ' при расчетах может приниматься равной 15...20°.

Опыты по определению силовых характеристик рабочих органов на почвах, залитых водой, проводились во ВНИИриса. Толщина слоя затопления достигала 0,10...0,20 м. Характеристика опытного участка приведена в табл. 3.6.

Таблица 3.6.

Характеристика почвы опытного участка

| Горизонт, см | Твердость почвы, МПа | |
|--------------|----------------------------|----------------------------------|
| | сухой, $W = 20 \dots 25\%$ | затопленной, $W = 20 \dots 25\%$ |
| 0...5 | 0,397 | 0,034 |
| 5...10 | 0,823 | 0,133 |
| 10...15 | 1,200 | 0,287 |
| 15...20 | 1,466 | 0,456 |

Опыты проводились в трех вариантах:

- - обработка почвы залитых водой чеков (условно по воде) ротационным плугом без рыхлительных лап;
- - обработка почвы не залитых водой чеков (условно посуху) ротационным плугом без рыхлительных лап;
- - на тех же полях с рыхлительными лапами, установленными перед барабаном ротационного плуга.

Результаты экспериментальных исследований по определению силовых характеристик ротационных рабочих органов при работе посуху и на залитой водой почве представлены на рис. 3.17 и 3.18.

Из графиков следует, что горизонтальная составляющая P_x при обработке почвы по воде в 1,5 раза меньше, чем посуху без рыхлительных лап, а вертикальная составляющая P_z в 5...13 раз меньше, чем посуху без рыхлительных лап и в 3 раза меньше, чем с рыхлительными лапами. Обе составляющие P_x и P_z с повышением скорости движения v увеличиваются при работе по воде менее интенсивно, чем при работе посуху.

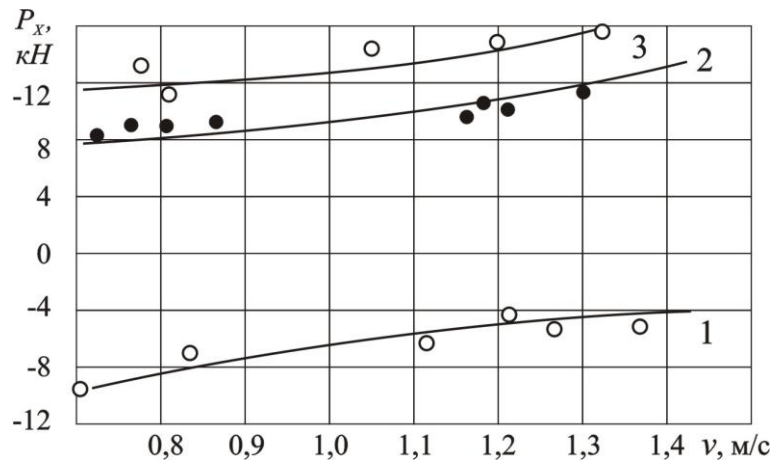


Рис. 3.17. Зависимость горизонтальной составляющей P_x от поступательной скорости v ($a = 0,20$ м) при различной глубине хода a_l :
1 – 0,15 м (посуху); 2 – 0 (по воде); 3 – 0 (посуху)

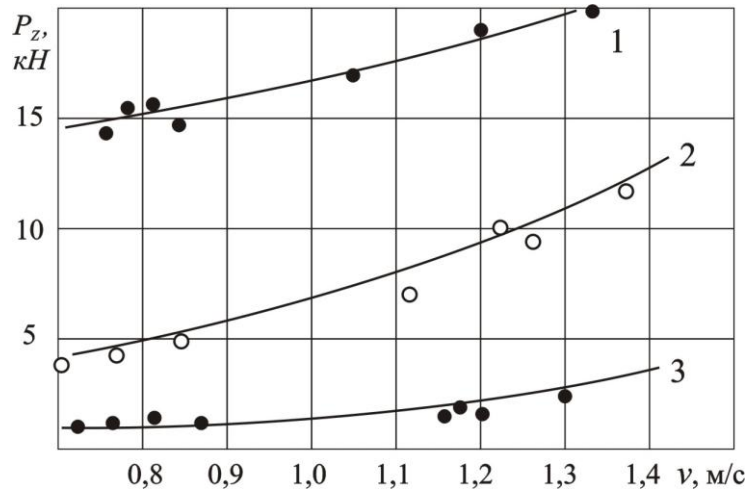


Рис. 3.18. Зависимость вертикальной составляющей P_z от поступательной скорости v ($a = 0,20$ м) при различной глубине хода a_l :
1 – 0 (посуху); 2 – 0,15 м (посуху); 3 – 0 (по воде)

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

Обработка экспериментальных данных силовых характеристик позволяет установить опытным путем значения коэффициентов K_P и K_{OTB} (табл. 3.7).

Таблица 3.7

Значения коэффициентов K_P и K_{OTB} для различных типов почв

| Скорость движения, v , м/с | Подача, s , м | Твердость почвы, p , МПа | Полнота рыхления, k_L | Коэффициенты | |
|------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------|--|---|
| | | | | k_P , Н/м ² ·10 ³ | K_{OTB} , Н·с ² /м ⁴ ·10 ⁻¹ |
| Южный малогумусный чернозем | | | | | |
| 0,8...2,0 | 0,15...0,2 | 0,8...1,2 | 0 | 95...102 | 14...15 |
| | | | 0,8...1,0 | 58...61 | 6,5...7,0 |
| | | 1,4...1,8 | 0 | 120...130 | 13...13,5 |
| | | | 0,8...1,0 | 63,3...67 | 8,5...9,0 |
| Темно-каштановая почва | | | | | |
| 0,9...2,5 | 0,16...0,2 | 1,7...2,7 | 0 | 46...50 | 7,3...9,1 |
| | | | 0,8...1,0 | 23,7...25,9 | 4,6...6,4 |
| | 0,08...0,2 | | 0 | 52...60 | 8,0...9,6 |
| | | | 0,8...1,0 | 24...26 | 5,0...6,7 |

Из данных табл. 3.7 следует, что предварительное рыхление почвы обеспечивает снижение величины обоих коэффициентов на 40...55%, что способствует снижению энергоемкости ротационной обработки почвы.

Величины аналогичных коэффициентов при работе на переувлажненной почве приведены в табл. 3.8. Эти данные показывают значительное снижение K_P и K_{OTB} на переувлажненной почве по сравнению с работой на сухой почве.

Таблица 3.8

Значения коэффициентов K_P и $K_{ОТБ}$ для переувлажненной почвы
($p = 0,2 \dots 0,4$ МПа)

| Скорость резания $v_a, \text{ м/с}$ | Коэффициенты | |
|--|---------------------------------|--|
| | $k_P, \text{ Н/м}^2 \cdot 10^3$ | $K_{ОТБ}, \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4 \cdot 10^{-1}$ |
| 2 | 34,16 | - |
| 3 | 36,09 | - |
| 4 | 38,1 | 21,6...40,6 |
| 5 | 40,6 | - |
| 6 | 43,8 | - |
| 7 | 46,6 | - |

Глава 4. Влияние различных факторов на энергоемкость МТА с ротационными комбинированными почвообрабатывающими машинами

К основным факторам, влияющим на расход мощности при работе комбинации приводных и тяговых рабочих органов, относятся:

1) кинематические параметры – окружная v_o и поступательная v скорости, а также их соотношение $\lambda = \frac{v_o}{v}$;

2) технологические параметры – глубина обработки a приводными и a_d тяговыми рабочими органами, подача s (или толщина стружки δ) и степень крошения почвы $k_{кр}$;

3) конструктивные параметры – диаметр барабана D , угол резания ножей α , ширина захвата ротационной машины B , тип тяговых рабочих органов (стрельчатые или рыхлительные лапы).

Из экспериментальных данных многих исследований следует, что основная доля энергозатрат (до 85...90%) приходится на резание почвенной стружки, ее крошение и отбрасывание.

Затраты мощности на преодоление сил трения, на перемещение машины и на преодоление потерь в передаточных механизмах относительно невелики и составляют менее 15...20%. Поэтому в последующем анализе эти составляющие баланса мощности машины учитываться не будут.

С учетом изложенного и на основании уравнения (2.56), при комбинированном способе передачи мощности от двигателя трактора к машине, общая потребная мощность выразится следующим образом:

$$\begin{aligned}
 N &= N_{ВОМ} \pm N_{КР} = N_P^{ПП} + N_P^T + N_{ОТБ}^{ПП} + N_{ОТБ}^T = \\
 &= kPaBv\left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) + ka_{Л}B^T + \varepsilon a_{Л}B_P^T v^2 + k_{ОТБ}aB_P^{ПП} \lambda^2 v^3. \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

Рассмотрим влияние основных факторов на общую потребляемую мощность.

4.1. Влияние поступательной скорости

Перепишем уравнение (4.1) следующим образом

$$N = N_{ВОМ} \pm N_{КР} = a_{Л}B_P^T v(k + \varepsilon v) + aB_P^{ПП} v\left[\left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) + k_{ОТБ}\lambda^2 v^2\right]. \quad (4.2)$$

Отсюда следует, что при $\lambda = \text{const}$ с увеличением поступательной скорости v составляющие баланса N_P^T и $N_P^{ПП}$ возрастают в линейной зависимости, составляющая $N_{ОТБ}^T$ - во второй степени, $N_{ОТБ}^{ПП}$ - в третьей степени. Исследование влияния поступательной скорости на энергозатраты представляет интерес с точки зрения возможности повышения производительности МТА при работе с фрезами и ротационными плугами.

Результаты наших опытов с ротационным плугом ПР-2 на установке УДР на темно-каштановой почве (г. Херсон) представлены на графиках рис. 4.1. При испытаниях подача $s = 0,19$ м сохранялась постоянной путем пропорционального изменения окружной скорости барабана, т.е. при $\lambda = \text{const}$.

Из графиков следует, что с ростом поступательной скорости v мощность $N_{ВОМ}$ интенсивно возрастает по кривой третьего порядка.

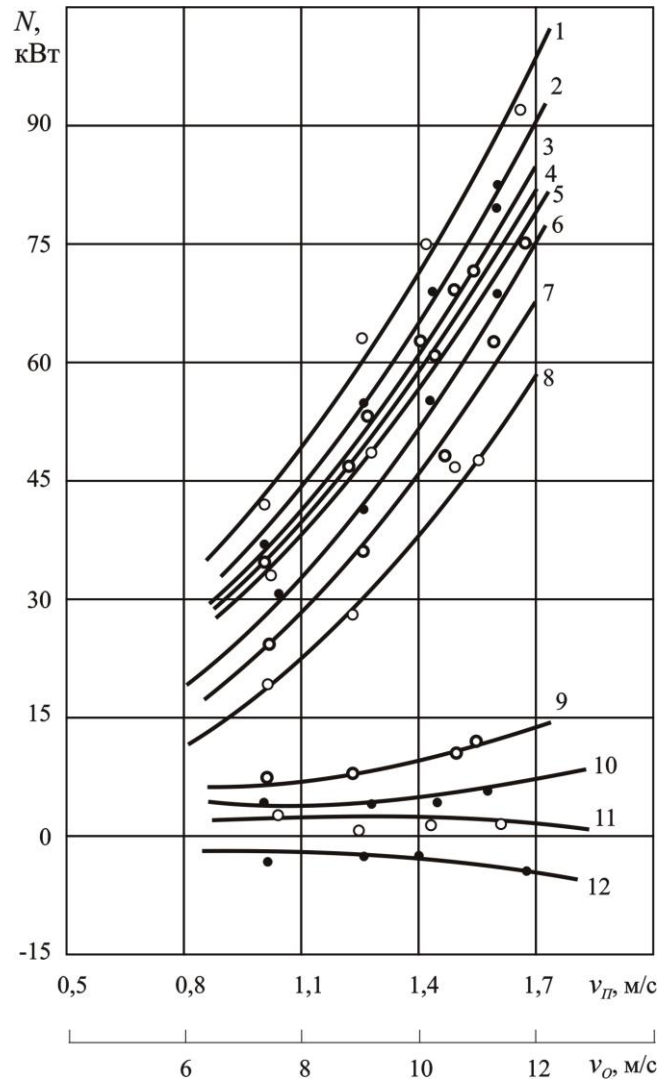


Рис. 4.1. Зависимость составляющих баланса мощности N (1-4 – N ; 5-8 – $N_{ВОМ}$; 9-12 – $N_{КР}$) ротационного плуга от поступательной скорости при $s = 0,19$ м и различной глубине хода лап:
 1, 5, 12 – $a_{Л} = 0$; 2, 6, 11 – $a_{Л} = 0,14$ м; 3, 7, 10 – $a_{Л} = 0,185$ м;
 4, 8, 9 – $a_{Л} = 0,23$ м

Предварительное рыхление почвы не влияет существенно на зависимость $N_{ВОМ}$ от v , изменяется лишь интенсивность прироста $N_{ВОМ}$. Так, если при $a_L = 0$ прирост мощности $N_{ВОМ}$ в интервале скоростей 1,6...2,2 м/с составляет 49 кВт на каждые 1 м/с увеличения скорости, то при $a_L = 0,23$ м прирост составляет лишь 29 кВт, т.е. снижение составляет почти 59%.

Без предварительного рыхления почвы при малой глубине a_L до 0,14 м мощность на крюке трактора $N_{КР}$ с ростом поступательной скорости увеличивается. С увеличением глубины хода лап мощность $N_{КР}$ меняет знак на противоположный и при $a_L = 0,14$ м практически остается постоянной, несмотря на повышение скорости v .

Зависимость составляющих баланса мощности машины от поступательной скорости при работе ротационного плуга на рисовых чеках представлена на рис. 4.2.

В этих опытах сохранялись постоянными: ширина захвата плуга $B = 2,1$ м; частота вращения барабана 130 мин^{-1} ; глубина обработки $a = 0,2$ м и глубина хода лап $a_L = 0,1$ м.

Из графиков рис. 4.2 следует, что мощность $N_{ВОМ}$ при работе по воде без лап и посуху с рыхлительными лапами примерно одинакова и на 40% меньше, чем $N_{ВОМ}$ при работе плуга посуху без лап. Мощность $N_{КР}$ при работе по воде и посуху без лап имеет отрицательное значение, т.к. в обоих случаях сила P_X направлена вперед по ходу плуга. Это обстоятельство имеет положительное влияние в условиях ограниченной проходимости трактора на залитых водой чеках, при резком снижении сцепления движителей с почвой.

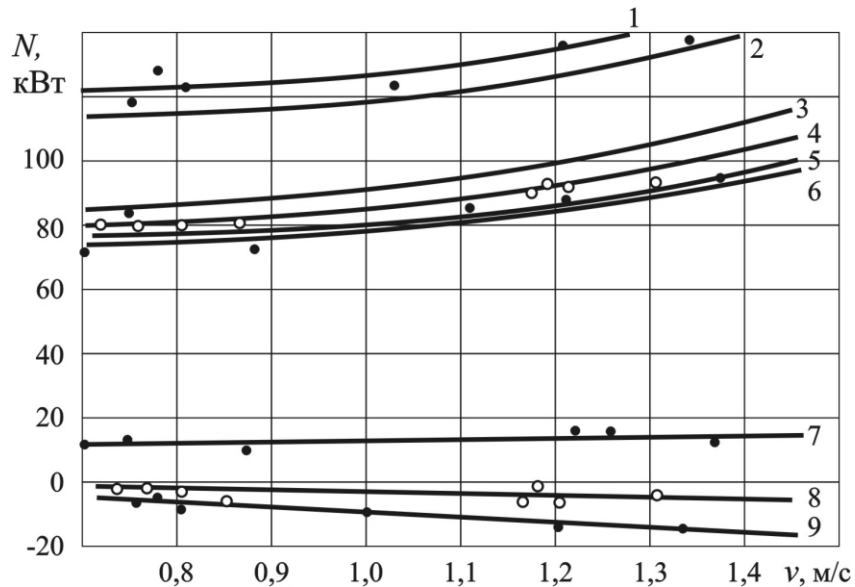


Рис. 4.2. Зависимость составляющих баланса мощности N МТА с ротационным плугом (2, 3, 5 – N ; 1, 4, 6 – $N_{ВОМ}$; 7-9 – $N_{КР}$): 1, 2, 9 – посуху без лап; 3, 4, 7 – посуху с лапами; 5, 6, 8 – по воде без лап

Как показали эксперименты, предварительное рыхление почвы снижает общую потребляемую мощность N , что позволяет повысить поступательную скорость и, соответственно, производительность МТА. Так, на фрезерном режиме работы при $s = 0,12$ м при установке культиваторных лап на глубину $a_{Л} = 0,23$ м по сравнению с работой ротационного плуга без лап, производительность повышается на 10...15%, а на пахотном режиме при $s = 0,19$ м – на 14...16%.

Для сравнительной оценки плуга на разных режимах работы использовали показатель удельной энергоемкости обработки почвы

$$\mathcal{E}'' = \frac{N}{aBv}, \text{ кВт/м}^3 \cdot \text{ч.}$$

Зависимость удельной энергоёмкости ротационного плуга ПР-2,7 шириной захвата $B = 2,7$ м от поступательной скорости v представлена на рис. 4.3.

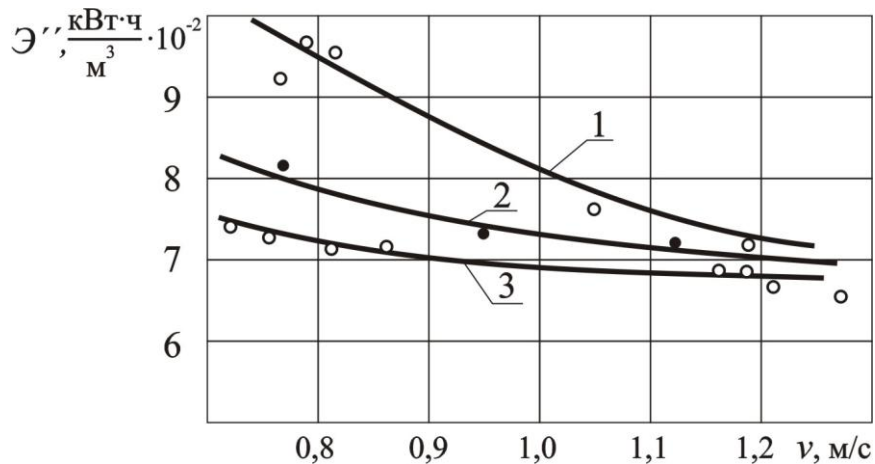


Рис. 4.3. Зависимость удельной энергоёмкости \mathcal{E}'' от поступательной скорости v при $\omega = 13,61 \text{ с}^{-1}$; $a = 0,20$ м:
1 – посуху без лап; 2 – посуху с лапами ($a_L = 0,10$ м); 3 – по воде

Из графиков следует, что с увеличением поступательной скорости для всех вариантов опытов величина удельной энергоёмкости уменьшается. Наименьшие значения \mathcal{E}'' наблюдаются при обработке по воде, а наибольшие – при обработке почвы посуху без лап.

Таким образом, энергоёмкость ротационной обработки почвы по воде ниже в 2 раза при поступательной скорости 0,7 м/с и в 1,2 раза – при скорости 1,2 м/с по сравнению с обработкой почвы посуху без рыхлительных лап.

4.2. Влияние окружной скорости барабана

Как было установлено многими исследователями [16, 59, 95], скорость резания определяет не только потребную мощность на отбрасывание, но и на резание почвы, т.к. удельное сопротивление резанию k_P зависит также от скорости деформации, а значит и от скорости резания.

При ротационной обработке почвы скорость резания v_a является переменной. Однако за короткое время резания почвенной стружки в первом приближении можно принять $v_a \approx v_O$. Тогда уравнение (4.1) после преобразований можно представить в виде

$$N = N_{ВОМ} \pm N_{KP} = a_{Л} B_P^T v (k + \varepsilon v) [k_P (1 - \frac{v}{v_O}) + k_{ОТБ} v_O^2]. \quad (4.3)$$

Из этого следует, что при постоянной поступательной скорости v мощность на резание N_P^{PP} увеличивается при росте окружной скорости v_O по гиперболической зависимости, а мощность на отбрасывание – по квадратичной зависимости. Аналогичные выводы были получены в работе болгарских ученых [86].

Иллюстрацией зависимости составляющих баланса мощности от окружной скорости v_O служат графики на рис. 4.1, где каждому значению поступательной скорости соответствует определенная величина окружной скорости, т.к. опыты проводились при $\lambda = \text{const}$. Из графиков видно, что при больших значениях v_O мощность N изменяется более интенсивно, чем при малых значениях v_O .

При $a_{Л} = 0$ мощность N_{KP} с ростом v_O увеличивается. При глубине хода лап $a_{Л} = 0,14$ м, равной примерно половине глубины обработки a ,

рост скорости v_O приводит к увеличению N_{KP} . Общая мощность N с ростом скорости v_O резко возрастает.

Предварительное рыхление почвы приводит к некоторому снижению общей мощности N .

Таким образом, эксперименты показывают, что увеличение окружной скорости ведет к возрастанию расхода энергии на ротационную обработку почвы. Поэтому целесообразно вести обработку почвы на возможно более низких окружных скоростях, допустимых агротехническими требованиями.

4.3. Влияние глубины ротационной обработки и глубины хода лап

Из уравнения (4.1) следует, что все составляющие баланса мощности N находятся в прямой зависимости от глубины обработки.

Зависимости N , $N_{ВОМ}$, N_{KP} от глубины обработки ротационным плугом с шириной захвата 2,0 м приведены на рис. 4.4.

Опыты проводились по стерне ячменя. Почва – выщелоченный чернозем среднесуглинистого механического состава, средняя влажность пахотного слоя 13,6...25,8%, средняя твердость 1,02...1,18 МПа. Графики на рис. 4.4 подтверждают, что зависимости N , $N_{ВОМ}$, N_{KP} при ротационной обработке почвы прямо пропорциональны глубине a .

Влияние глубины хода лап a_L и полноты рыхления k_L на усилие на крюке трактора P_{KP} показано на рис. 4.5.

Без предварительного рыхления почвы ($a_L = 0$) усилие на крюке трактора P_{KP} достигает значительных величин, его абсолютное значение увеличивается с ростом подачи s . Так, усилие P_{KP} возрастает с 1,8 кН при подаче $s = 0,065$ м до 7 кН при $s = 0,172$ м. Наличие столь большого толкающего усилия ухудшает управляемость трактора.

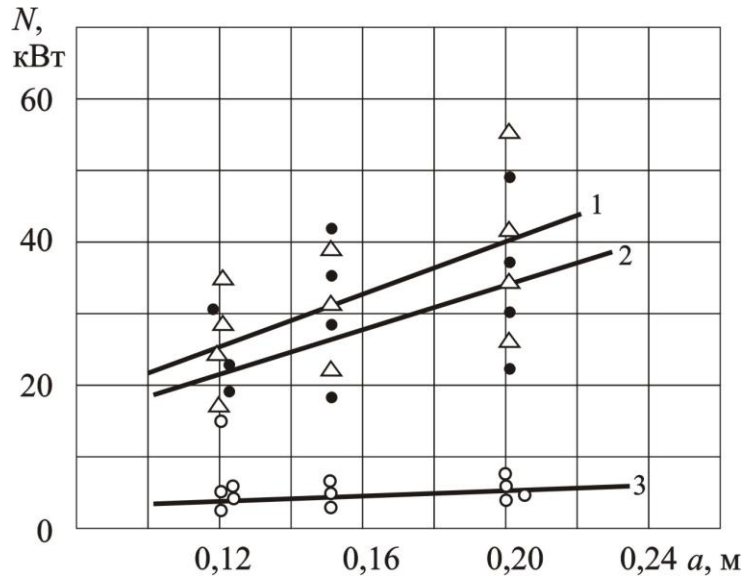


Рис. 4.4. Зависимости составляющих баланса мощности N от глубины обработки ротационным плугом a (при $s = 0,106$ м и диаметре барабана $D = 0,6$ м):
1 - N ; 2 - $N_{ВОМ}$; 3 - $N_{КР}$

С увеличением глубины хода лап a_L абсолютное значение усилия на крюке трактора $P_{КР}$ сначала снижается и при $a_L = 0,10 \dots 0,14$ м становится равным нулю, а затем возрастает, меняя направление, и переходит в тяговое сопротивление.

Статистическая обработка значений усилия $P_{КР}$ показала, что с увеличением глубины хода лап, его среднеквадратическое отклонение снижается, что уменьшает динамические нагрузки на двигатель трактора.

Рост усилия на крюке трактора $P_{КР}$ обусловлен не только увеличением сопротивления P_X^L и ростом сопротивления перемещению плуга, т.к. возрастает вертикальная нагрузка на опорные колеса за счет роста составляющей P_Z^L и снижения вертикальной составляющей P_Z .

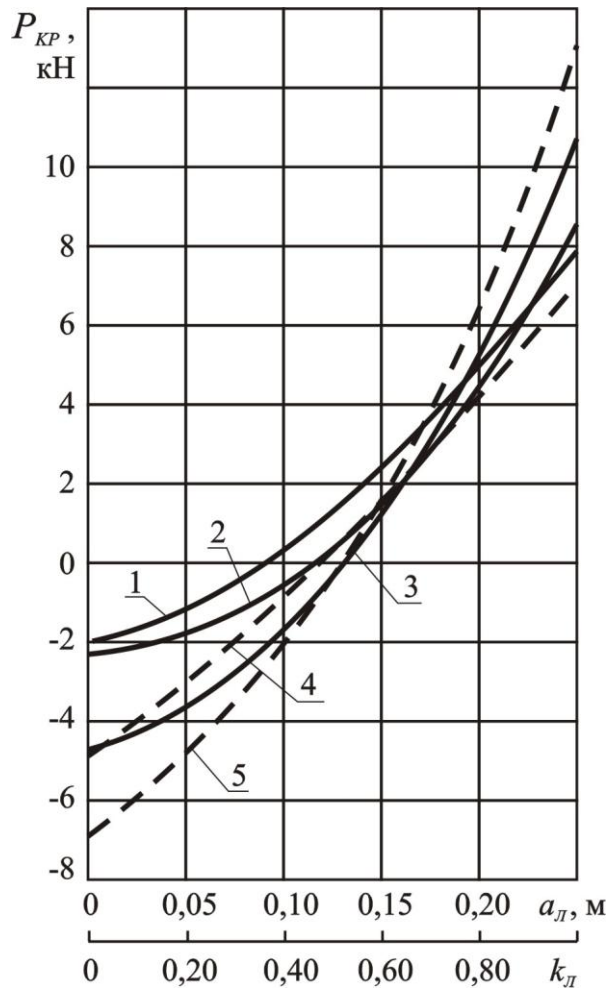


Рис. 4.5. Зависимости усилия на крюке трактора P_{KP} от глубины хода лап $a_{П}$ и полноты рыхления $k_{Л}$ при различных подачах s :

- 1 – 0,085 м ($v = 1,25$ м/с; $a = 0,27$ м; темно-каштановая почва);
- 2 – 0,155 м ($v = 1,25$ м/с; $a = 0,27$ м; темно-каштановая почва);
- 3 – 0,155 м ($v = 2,50$ м/с; $a = 0,27$ м; темно-каштановая почва);
- 4 – 0,172 м ($v = 1,80$ м/с; $a = 0,15$ м; суглинок);
- 5 – 0,172 м ($v = 1,40$ м/с; $a = 0,20$ м; южный гумусовый чернозем)

Анализ силовых характеристик плуга и культиваторных лап показывает, что при $a_L = 0$ и $k_L = 0$ абсолютное значение составляющей P_Z на барабане приближается по величине к силе тяжести плуга. В этом случае вертикальная реакция на опорных колесах плуга и их сопротивление перекачиванию близки к нулю.

При полноте рыхления $k_L \approx 1$ суммарная вертикальная составляющая силы резко снижается. Вследствие этого опорные колеса воспринимают практически всю силу тяжести плуга. Принимая коэффициент сопротивления качению колес плуга по стерне $\mu_M = 0,08 \dots 0,1$, получим, что сопротивление перемещению плуга составит $0,9 \dots 1,1$ кН, т.е. значительную часть общего сопротивления на крюке P_{KP} .

4.4. Влияние подачи

Введем в уравнение (4.2) подачу s и в результате преобразований получим

$$N = a_L B_P^T v(k + \varepsilon v) + a B_P^{IP} v \left[k_P \left(1 - \frac{sZ}{\pi D} \right) + k_{OTB} \left(\frac{sZ}{\pi D} \right)^2 v^2 \right]. \quad (4.4)$$

Из этого уравнения следует, что при постоянной поступательной скорости v с увеличением подачи s составляющие мощности N_P^{IP} и N_{OTB} уменьшаются: первая в прямой пропорции, а вторая – в обратной.

Зависимость составляющих баланса мощности ротационного плуга ПР-2 от подачи показана на рис. 4.6.

Из графиков видно, что особенно резкое снижение общей мощности N и составляющих $N_{ВОМ}$ и N_{KP} происходит при подачах в диапазоне $0,08 \dots 0,14$ м. При дальнейшем росте подачи s интенсивность снижения мощности несколько падает. Установка культиваторных лап

приводит к снижению N и $N_{ВОМ}$. Составляющая мощности $N_{КР}$ с ростом подачи увеличивается, однако при $a_{Д} = 0,185$ м она остается практически постоянной.

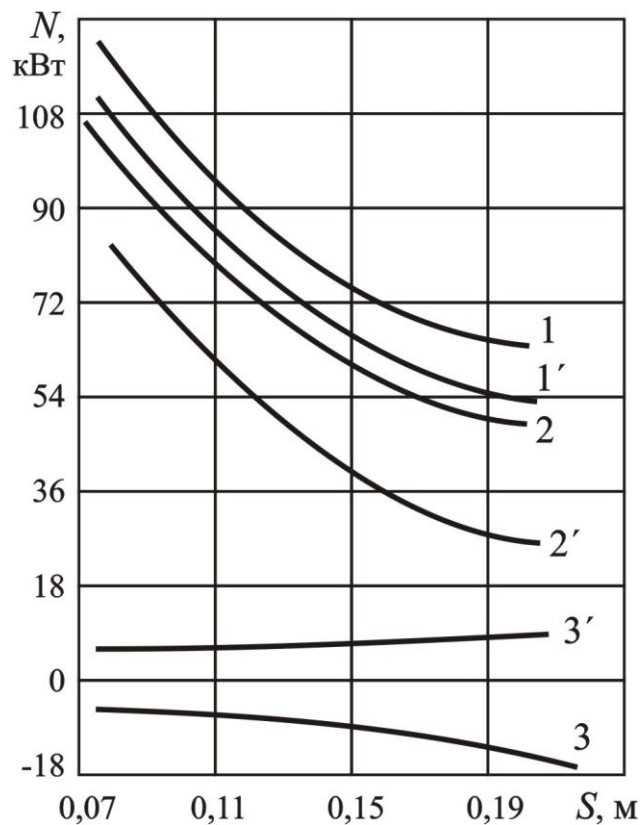


Рис. 4.6. Зависимость составляющих баланса мощности N МТА от подачи s при $v = 1,67$ м/с и $a_{Д} = 0$ (кривые 1–3) и $a_{Д} = 0,185$ (кривые 1'–3'): 1, 1' – N ; 2, 2' – $N_{ВОМ}$; 3, 3' – $N_{КР}$

Снижение мощностей N и $N_{ВОМ}$ с ростом подачи происходит за счет снижения скорости резания и уменьшения степени крошения почвы. На пахотном режиме ($s = 0,15 \dots 0,25$ м) при малых поступательных

скоростях (0,835...1,4 м/с) наибольшее снижение мощности N достигается при $a_{Л} = 0,15$ м ($k_{Л} \leq 0,5$), т.е. при установке лап на половину глубины обработки ротационным плугом.

С увеличением скорости v до 1,7...2,5 м/с на пахотных режимах наибольшее снижение N достигается при $a_{Л} = 0,18$ м ($k_{Л} \leq 0,6$).

На фрезерных режимах ($s = 0,05...0,12$ м) оптимальная глубина хода культиваторных лап $a_{Л} \geq 0,20$ м ($k_{Л} > 0,8$), т.е. при установке лап почти на полную глубину обработки ротационным плугом.

Из приведенных данных следует, что с точки зрения сокращения энергозатрат, ротационная обработка почвы должна производиться на возможно больших подачах, допускаемых агротехническими требованиями. При этом для соответствующих режимов работы культиваторные лапы необходимо устанавливать на оптимальную глубину.

Для более детального анализа составляющих баланса мощности МТА с комбинированным ротационным плугом РП-200 в сравнении с серийным лемешным плугом ПН-3-35 были проведены экспериментальные исследования на специально оборудованном тензометрическом тракторе МТЗ-80 с двигателем СМД-15К мощностью 73,6 кВт.

Тензометрическая аппаратура и датчики (рис. 4.7) позволяли регистрировать следующие показатели:

1. Крутящий момент на ведущем валу коробки передач трактора $M_{дв}$.
2. Суммарный крутящий момент на ведущих колесах трактора $\Sigma M_{К}$.
3. Крутящий момент на ВОМ трактора $M_{ВОМ}$.
4. Суммарное усилие в нижних тягах навески трактора $\Sigma P_{Т}$.
5. Усилие в верхней тяге навески $P_{ЦТ}$.

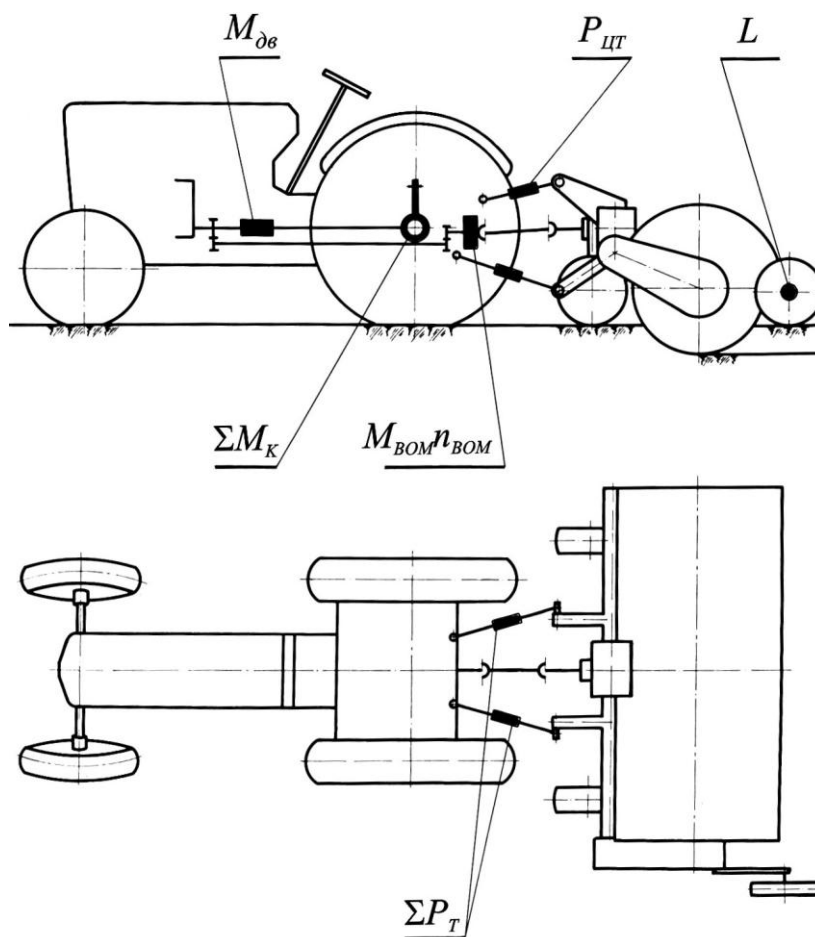


Рис. 4.7. Схема измерения показателей работы трактора с ротационным плугом

6. Частота вращения ВОМ $n_{\text{ВОМ}}$ и ведущих колес трактора

$$n_K = \frac{n_{\text{пр}} + n_{\text{лев}}}{2}.$$

7. Путь, проходимый агрегатом за опыт L .

8. Время опыта t .

При работе с лемешным плугом фиксировались все перечисленные параметры, за исключением крутящего момента и частоты вращения ВОМ трактора.

Крутящие моменты определялись: на валу двигателя – ротационным динамометром, на ведущих колесах – торсионными динамометрами, на ВОМ – тензометрической карданной вилкой.

Усилия в тягах навески определялись при помощи тензометрических звеньев, встроенных в тяги.

Суммирование крутящих моментов ведущих колес и усилий в тягах навески проводилось электрическим способом. При этом использовались тензодатчики сопротивления. Запись частоты вращения ведущих колес производилась при помощи контактных отметчиков, частоты вращения ВОМ – индукционным датчиком. Путь МТА регистрировался отметками «пятого» колеса [17].

На рис. 4.8 приведены схемы сил, действующих на ротационный и лемешный плуги, а на рис. 4.9 показаны оба плуга в работе с трактором МТЗ-80.

Зависимости измеренных параметров и режимов работы ротационного плуга шириной захвата $B = 1,04$ м с трактором МТЗ-80 на суглинке тяжелого механического состава, влажностью 24% и твердостью 0,2 МПа при глубине пахоты $a = 0,20$ м, с подачей $s = 0,172$ м, при поступательной скорости $v = 1,53$ м/с показаны на рис. 4.10.

При работе плуга без культиваторных лап ($a_{Л} = 0$) создается подталкивающее усилие P_{KP} (с отрицательным знаком), чем обусловлено появление отрицательного момента ΣM_K на ведущих колесах трактора, отрицательного буксования (проскальзывания) колес $\delta = - 0,02$.

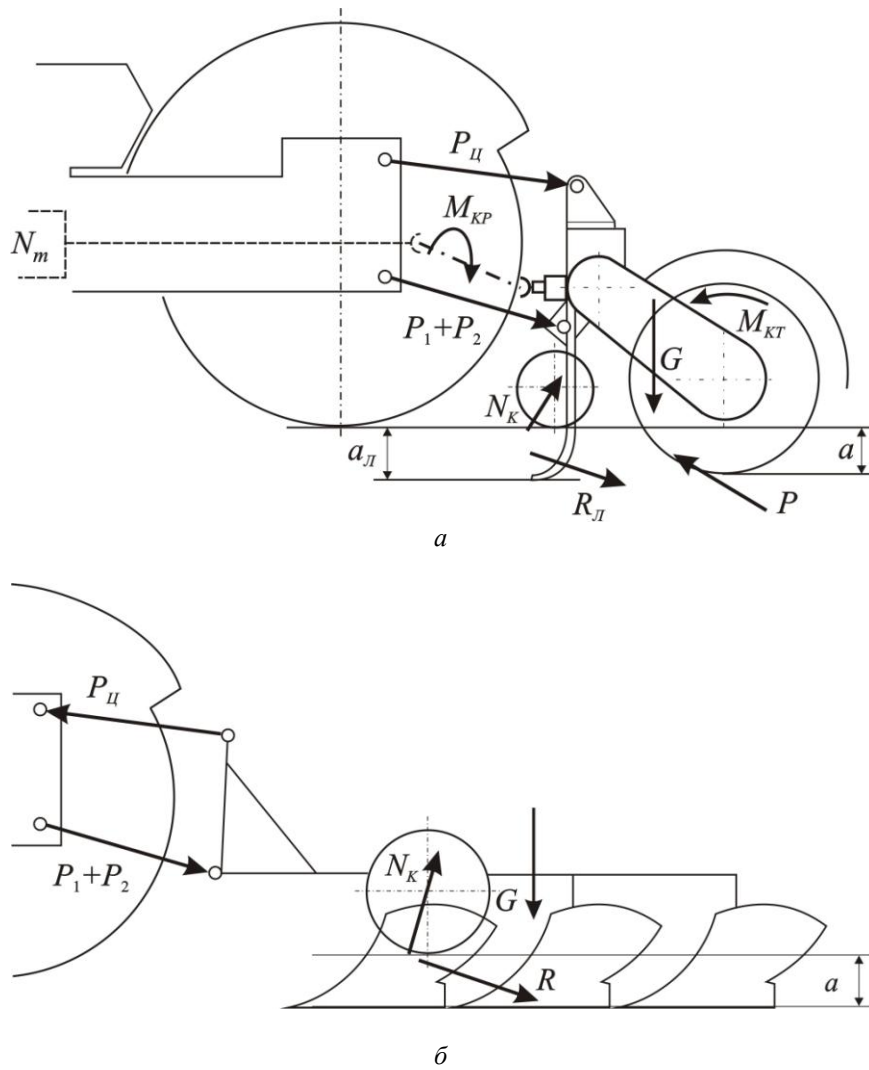


Рис. 4.8. Схемы сил, действующих на ротационный (а) и лемешный (б) плуги



а



б

Рис. 4.9. Ротационный (*а*) и лемешный (*б*) плуги на испытаниях

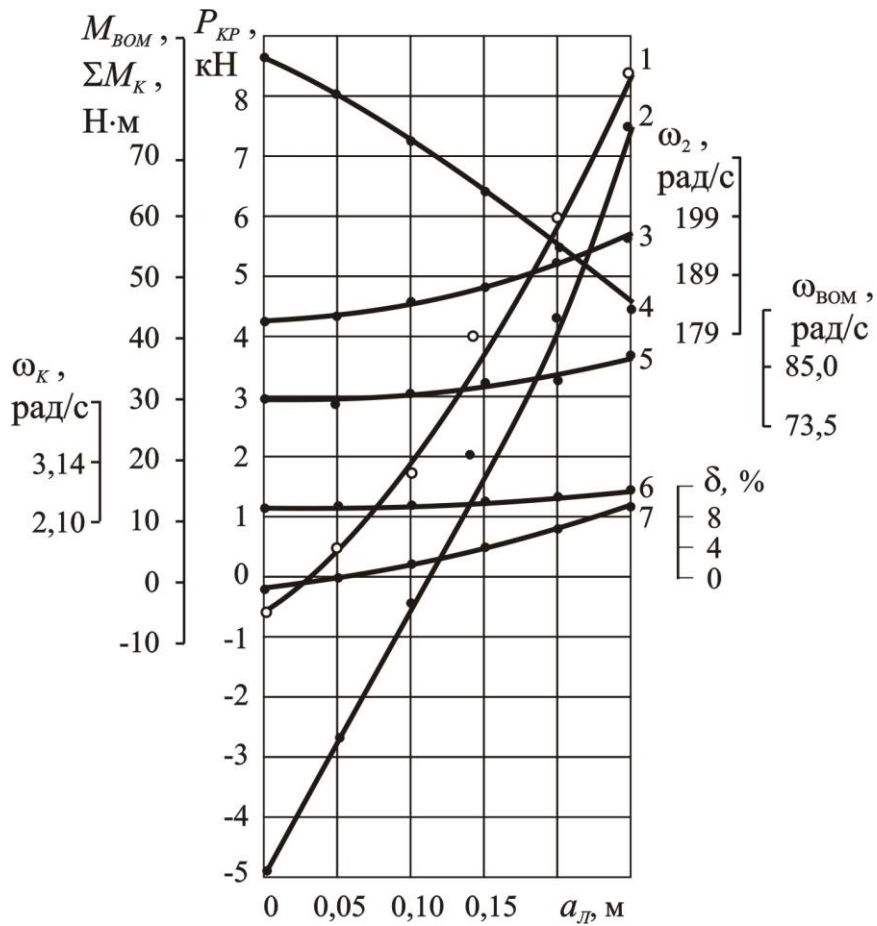


Рис. 4.10. Зависимость силовых и кинематических параметров работы МТА от глубины хода лап $a_{л}$
 (при $s = 0,172$ м; $a = 0,155$ м; $v = 1,8$ м/с; $B = 1,07$ м):
 1 - M_K ; 2 - P_{KP} ; 3 - ω_e ; 4 - $M_{ВОМ}$; 5 - $\omega_{ВОМ}$; 6 - ω_K ; 7 - δ

При установке впереди барабана культиваторных лап крутящий момент, передаваемый через ВОМ, резко снижается. Угловые скорости ведущего вала коробки передач ω_e и ВОМ $\omega_{ВОМ}$ повышаются, что происходит из-за снижения нагрузки на двигатель по мере заглубления лап. Это подтверждается также снижением эффективной мощности N_e двигателя трактора (рис. 4.11).

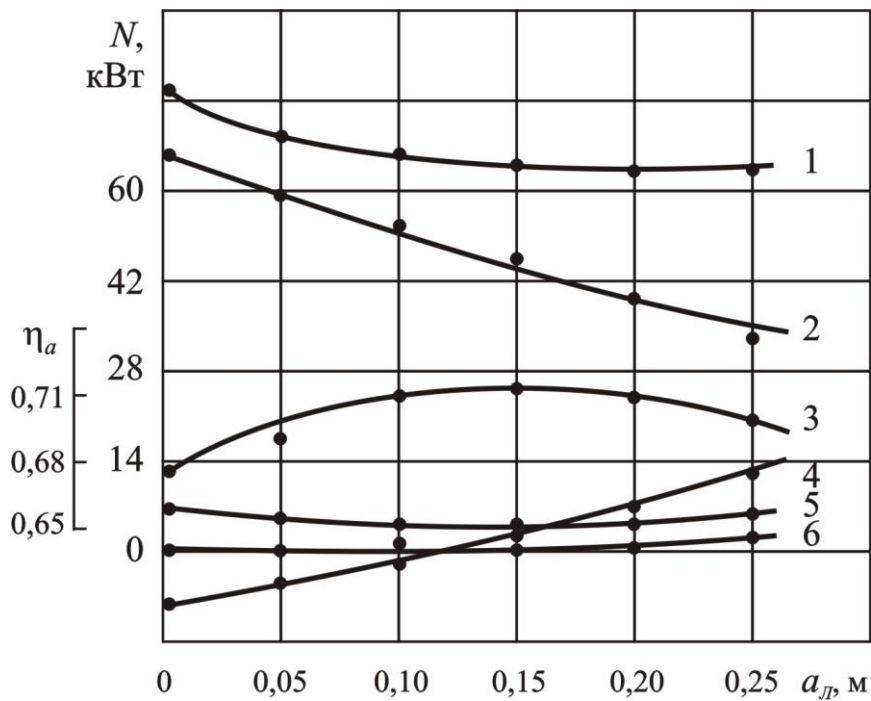


Рис. 4.11. Баланс мощности МТА с ротационным плугом в зависимости от глубины хода лап $a_{л}$ (при $s = 0,172 м$; $a = 0,155 м$; $v = 1,8 м/с$):

1 - N_e ; 2 - $N_{ВОМ}$; 3 - η_e ; 4 - $N_{КР}$; 5 - N_f ; 6 - N_{δ}

При глубине хода культиваторных лап $a_{л} = 0$ через ВОМ трактора передается до 90% мощности N_e . Увеличение глубины хода лап $a_{л}$

приводит к уменьшению сил сопротивления почвы ротационной обработке и к снижению $N_{ВОМ}$. При коэффициенте полноты рыхления $k_L \geq 1$ ($a_L = 0,15 \dots 0,20$ м) снижение $N_{ВОМ}$ достигает 40...50%. С увеличением глубины хода лап составляющая баланса мощности $N_{КР}$ возрастает. Так, если при $a_L = 0$ мощность $N_{КР}$ имела отрицательное значение и составляла 12...13% от мощности N_e , то при глубине $a_L = 0,15 \dots 0,20$ м мощность $N_{КР}$ составляла 23...25% от N_e . Изменение глубины хода лап незначительно влияет на величины составляющих баланса мощности N_f и N_δ .

Мощность N_f , расходуемая на передвижение трактора с увеличением глубины хода лап снижается и достигает минимального значения при a_L равной глубине a работы ротационного плуга. С дальнейшим ростом a_L мощность N_f увеличивается. Это объясняется тем, что изменяются нагрузки на передние и задние колеса трактора: при увеличении a_L уменьшается выталкивающее усилие P_Z и возрастает вертикальная составляющая P_Z^L , что вызывает увеличение нагрузки на задние колеса трактора и уменьшение нагрузки на передние колеса и, соответственно, уменьшение N_f . При дальнейшем увеличении a_L разгрузка передних колес достигает такой величины, что сопротивление перекатыванию возрастает.

Мощность расходуемая на буксование движителей трактора N_δ имеет аналогичную зависимость от a_L .

Из полученных данных следует, что при работе ротационного плуга без культиваторных лап или при их незначительной глубине хода, мощность на крюке трактора $N_{КР}$ превышает мощность $N_{П} = N_f + N_\delta$, расходуемую на перемещение и буксование трактора. Это обуславливает

появление «циркулирующей» мощности $N_{Ц} = N_{КР} - (N_f + N_{\delta})$.

Анализ экспериментальных данных показывает, что $N_{Ц}$ составляет для данного МТА 2,0...2,95 кВт и ее доля в общем балансе мощности не превышает 3...4%.

Из сказанного следует вывод, что установка культиваторных лап впереди барабана ротационного плуга приводит к существенному перераспределению составляющих баланса и уменьшению затрат общей мощности МТА. При оптимальном заглублении лап общая мощность уменьшается более интенсивно, что связано со значительным уменьшением $N_{ВОМ}$. По мере увеличения $N_{КР}$ интенсивность снижения N падает и при $a_{Л} = 0,15$ м практически остается постоянной. Изменение глубины хода лап существенным образом изменяет КПД МТА (см. рис. 4.11). Максимальное значение КПД $\eta_a = 0,71$ примерно соответствует равенству $a_{Л} = a$.

4.5. Влияние диаметра ножевого барабана

Из уравнения (4.4) следует, что при постоянной поступательной скорости, составляющие общей мощности $N_P^{ПР}$ и $N_{ОТБ}^{ПР}$ возрастают с увеличением диаметра барабана, причем мощность на отбрасывание почвы пропорциональна квадрату диаметра D барабана. Результаты испытаний ротационного плуга шириной захвата 2,0 м с различными диаметрами барабанов представлены на рис. 4.12.

На ротационный плуг устанавливались барабаны диаметром D 1,0 м; 0,8 м и 0,6 м. Испытания проводились на подачах s 0,11 м; 0,16 м; 0,20 м и 0,23 м. На фрезерном режиме для барабанов диаметром 1,0 м и

0,8 м работа велась на двух глубинах 0,15 м и 0,20 м; для барабана диаметром 0,6 м – на трех глубинах 0,10 м; 0,15 м и 0,20 м.

Из графиков рис. 4.12 следует, что с увеличением поступательной скорости МТА затраты мощности N растут для всех вариантов опытов. При работе на глубину выше 0,15 м наименьшие энергозатраты имеет плуг с барабаном диаметром 0,8 м. На малых глубинах обработки (до 0,15 м) рационально использовать барабан диаметром 0,6 м.

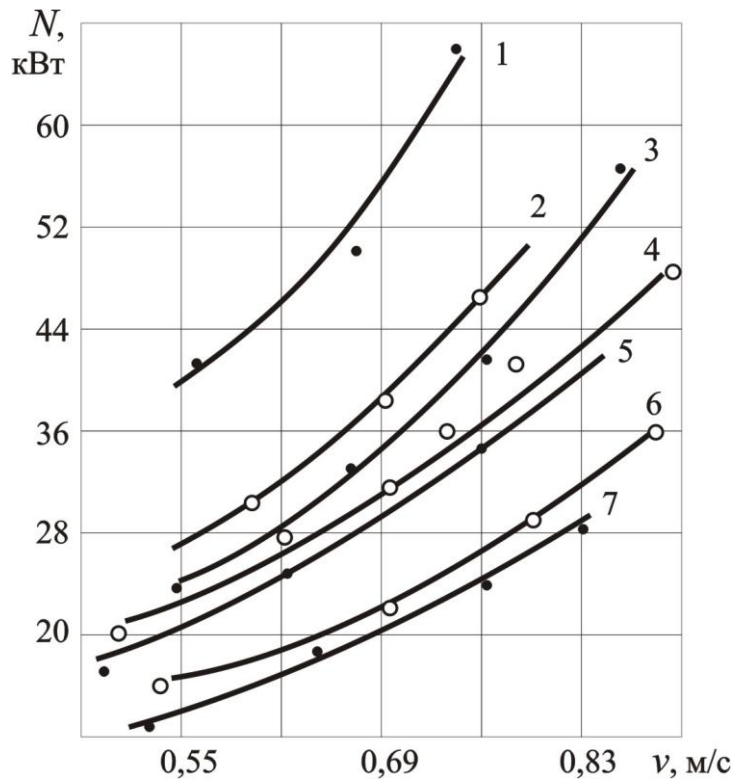


Рис. 4.12. Зависимость общей мощности N для работы ротационной почвообрабатывающей машины от поступательной скорости v при различных диаметрах барабана:
 1, 2 – $D = 1,0$ м; 3, 4, 7 – $D = 0,6$ м; 5, 6 – $D = 0,8$ м

Данные этих опытов представлены на рис. 4.13 как зависимости N от D . График показывает, что при диаметре барабана 0,8 м затраты мощности минимальны.

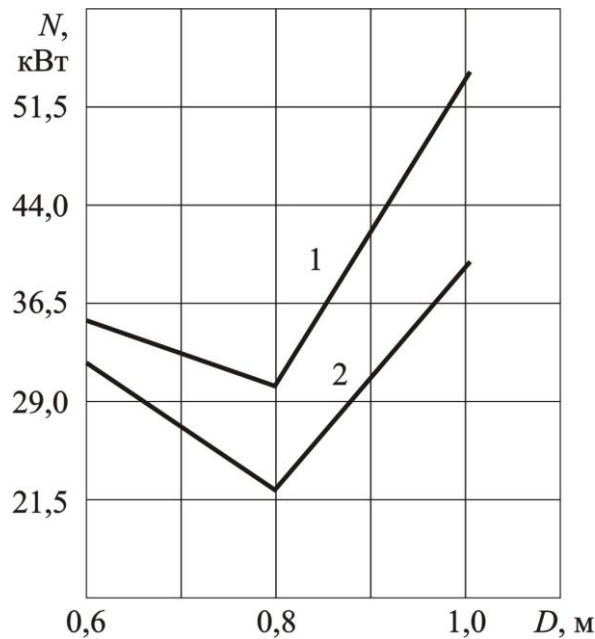


Рис. 4.13. Зависимость мощности N от диаметра барабана D при различной глубине обработки a ($s = 0,107$ м; $v = 0,695$ м/с):
1 – 0,2 м; 2 – 0,15 м

4.6. Влияние ширины захвата машины

Влияние ширины захвата ротационной почвообрабатывающей машины на энергоёмкость процесса тесно связано с числом одновременно работающих ножей согласно (2.33).

Из уравнения (4.1) следует, что мощность N прямо пропорциональна ширине захвата B . Однако, учитывая, что не все ножи

работают одновременно, можно ожидать непропорциональность роста N от B . Так, по данным [27], при увеличении ширины захвата фрезы более чем в три раза, затраты мощности возросли лишь в 2,2...2,3 раза.

На рис. 4.14 показана зависимость N от B для ротационного плуга ПР-2,7. Этот плуг является модификацией модели ПР-2 с увеличенной шириной захвата 2,7 м для работы с трактором Т-150К. Впереди барабана ПР-2,7 установлены четыре культиваторные лапы шириной 330 мм каждая.

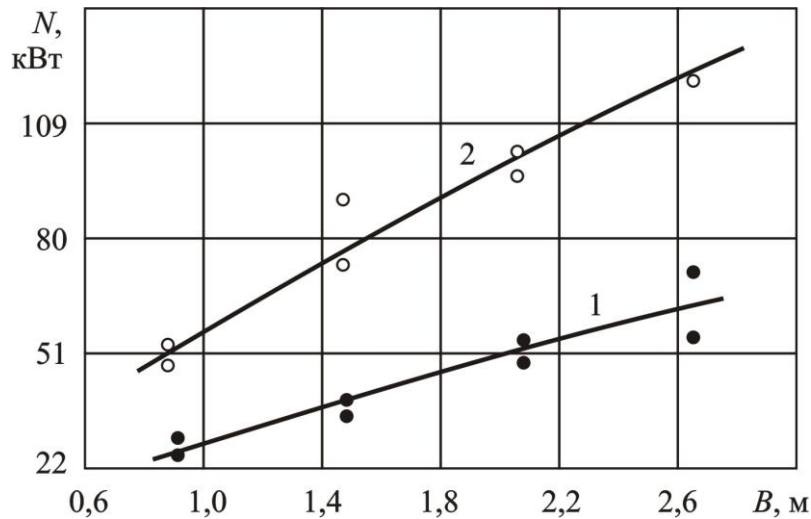


Рис. 4.14. Зависимость общей мощности N от ширины захвата плуга B при скоростях: 1 – $v = 1,17$ м/с; 2 – $v = 1,95$ м/с

Ширина захвата плуга равна произведению числа z_C ножевых секций на ширину b_C секции, т.е. $B = z_C b_C^*$. Из графика на рис. 4.14

* Ножевая секция состоит из одной пары Г-образных ножей, установленных горизонтальными полками навстречу друг другу. Ширина захвата секции плуга ПР-2,7 равна 0,3 м.

следует, что при $v = 1,17$ м/с и $B = 0,9$ м (три секции) на одну секцию приходится мощность 7,2 кВт, а при $B = 2,7$ м (девять секций) на одну секцию приходится мощность 6,3 кВт, т.е. на 33% меньше. Следовательно, работа плуга с большей шириной захвата более эффективна с точки зрения затрат энергии. Это объясняется тем, что при увеличении ширины захвата плуга изменяется только число средних секций, условия работы которых одинаковы. Число крайних (концевых) секций остается неизменным, а они имеют повышенные энергозатраты, т.к. работают в условиях полублокированного резания.

4.7. Влияние степени крошения почвы

Сравнение различных типов почвообрабатывающих машин по энергоемкости можно производить как по абсолютной величине потребляемой энергии, так и по величине удельной мощности, приходящейся на единицу ширины захвата машины (кВт/м). В случае, когда сравниваемые машины работают на разной глубине и разной поступательной скорости, более правильным является сравнение их по удельной мощности, приходящейся на единицу обработанной площади (кВт/м²), или, более корректно, на единицу объема обработанной почвы в единицу времени (кВт·ч/м³).

Для примера на рис. 4.15 показаны зависимости удельной мощности ротационного, лемешного и дискового плугов. Из графиков следует, что удельные энергозатраты ротационного плуга по мере увеличения подачи на нож s снижаются и на пахотных режимах $s = 0,25$ м его удельная энергоемкость ниже, чем у дискового, но почти в два раза выше, чем у лемешного плуга. На рис. 4.16 показана зависимость удельной энергоемкости ротационного плуга от глубины хода лап.

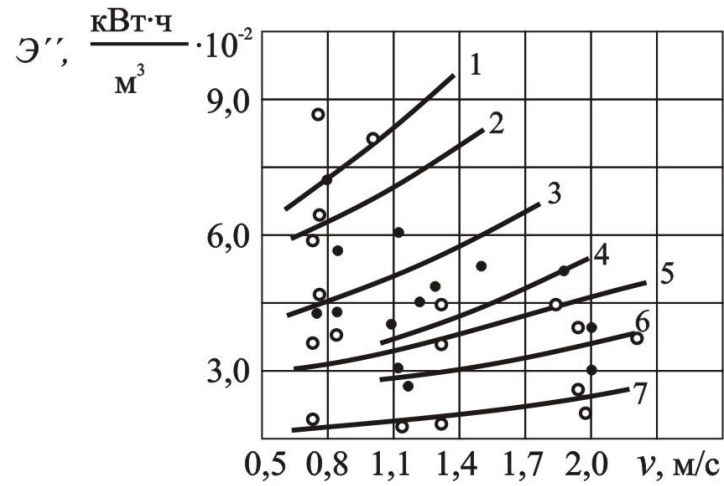


Рис. 4.15. Зависимость удельной энергоёмкости \mathcal{E}'' ротационного ПР-2,7 (1-4; 6), дискового ПНД-4-30 (5) и лемешного ПЛН-4-35 (7) плугов от поступательной скорости при подаче s равной: 1 – 0,073 м; 2 – 0,135 м; 3 – 0,198 м; 4 – 0,25 м ($a = 0,25$ м); 5 – 0,25 м ($a = 0,15$ м)

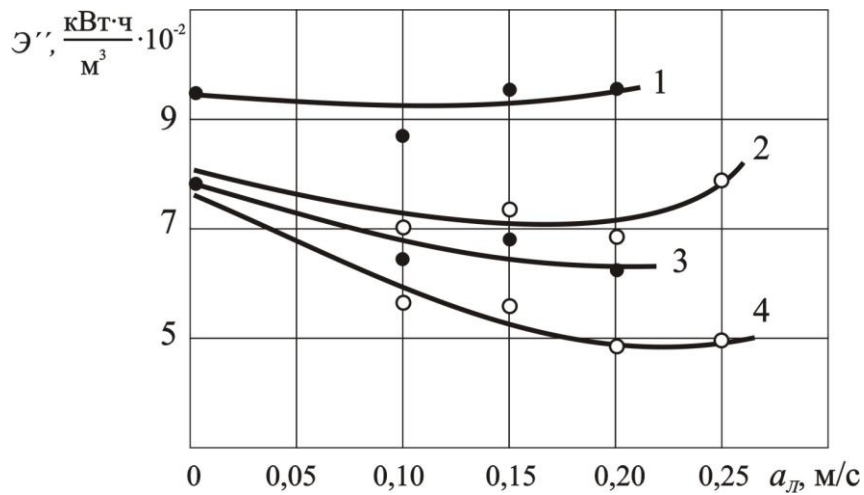


Рис. 4.16. Зависимости удельной энергоёмкости \mathcal{E}'' от глубины хода лап $a_{л}$ при $B = 1,07$ м, $v = 1,40$ м/с (1, 2), $v = 0,83$ м/с (3, 4), и различных подачах s : 1,3 – 0,125 м; 4 – 0,172 м

Из графиков рис. 4.16 следует, что оптимальная глубина хода лап находится в диапазоне $a_{л} = 0,18 \dots 0,23$ м, что соответствует максимальному КПД МТА.

Повышенные энергозатраты ротационного плуга по сравнению с дисковыми и лемешными плугами, как было показано выше, объясняются более высокой степенью крошения почвы даже на пахотных режимах. Поэтому более объективной оценкой для сравнения различных почвообрабатывающих машин является учет производимой ими степени крошения почвы [43, 51].

Степень крошения почвы определяется при фракционном анализе обработанного слоя почвы с помощью сит и решет [76]. Для удобства и наглядности представления экспериментальных данных фракционного анализа часто используют такой показатель, как средний диаметр d_i почвенного комка каждой i -й фракции

$$d_i = \frac{d_B + d_H}{2}, \quad (4.5)$$

где d_B и d_H – размеры отверстий верхнего и нижнего смежных решет или сит.

Для всей пробы одного опыта средневзвешенный диаметр почвенного комка определяется по зависимости

$$d_{CP} = \sum_{i=1}^n p_i d_i, \quad (4.6)$$

где $p_i = \frac{Q_i}{Q_{П}}$ – доля соответствующей фракции в почвенной пробе;

Q_i и $Q_{П}$ – массы i -й фракции и всей пробы почвы;

n – число фракций.

Почва в естественно сложенном состоянии пронизана корнями растений, микро- и макротрещинами и даже без взаимодействия с рабочими органами почвообрабатывающих машин распадается на глыбы и комки. Поэтому при оценке степени крошения под воздействием того или иного рабочего органа необходимо учитывать первоначальный размер почвенного комка d_{CP} естественно сложенной почвы. Кроме того, существенное влияние на степень крошения оказывает рыхление культиваторными лапами (рис. 4.17).

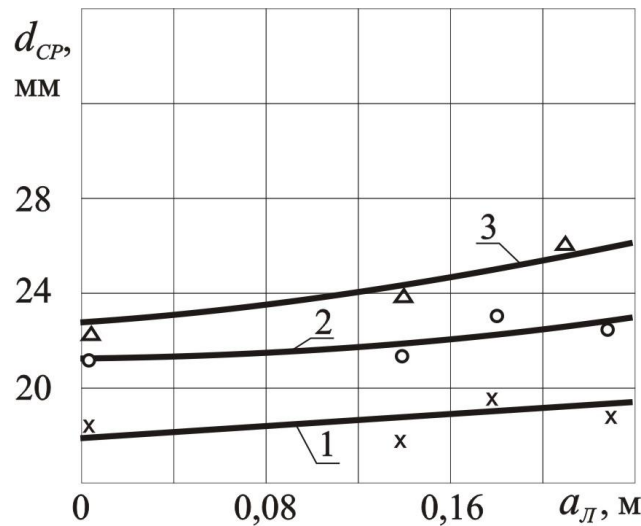


Рис. 4.17. Зависимости размера средневзвешенного комка d_{CP} почвы от глубины хода $a_{Л}$ культиваторных лап (Херсонская обл., $v = 1,03$ м/с):
1 – 0,085 м; 2 – 0,125 м; 3 – 0,19 м

Из графиков следует, что при увеличении глубины хода культиваторных лап средневзвешенный размер почвенного комка увеличивается и соответственно снижается степень крошения почвы, т.к. согласно действующим стандартам степень крошения определяется

отношением массы фракций почвенных комков размером больше или равном 50 мм (ΣQ_{50}) к общей массе Q_{II} почвенной пробы [8]:

$$k_p = \frac{\Sigma Q_{50}}{Q_{II}} 100, \% \quad (4.7)$$

Так, при подаче $s = 0,19$ м увеличение a_L от 0 м до 0,23 м приводит к росту d_{CP} от 23 мм до 26 мм, т.е. на 14%.

Интенсивный рост d_{CP} при увеличении глубины a_L особенно заметен на пахотных режимах $s = 0,125 \dots 0,190$ м. На фрезерных режимах ($s = 0,085$ м) глубина установки лап влияет на d_{CP} незначительно.

Таким образом, несмотря на двойное воздействие на почву (культиваторных лап и ротационных ножей), степень крошения не только не увеличивается, но даже уменьшается, т.е. ротационные ножи меньше крошат предварительно разрыхленную почву, чем монолитную. Это объясняется ухудшением передачи энергии удара при взаимодействии ротационных рабочих органов с предварительно разрыхленной почвой (см. уравнение (2.11)).

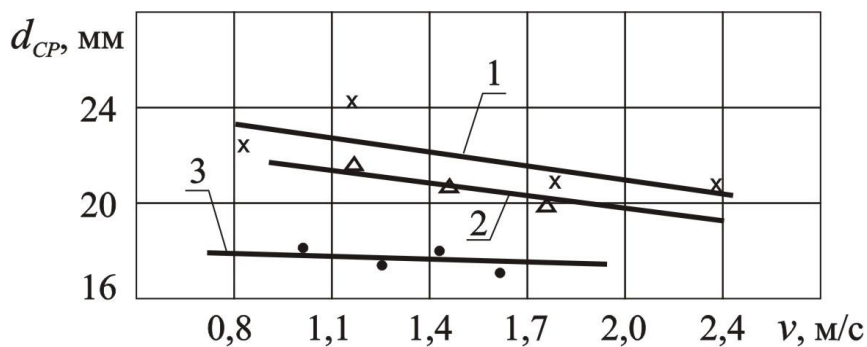


Рис. 4.18. Зависимости d_{CP} от скорости v при различной подаче s (стерня пшеницы, Херсонская обл., $a_L = 0$; $a = 0,27$ м):
1 – $s = 0,19$ м; $s = 0,125$ м; $s = 0,085$ м

На рис. 4.18 показана зависимость d_{CP} от поступательной скорости v машины. Из графиков следует, что при увеличении поступательной скорости с 0,8 до 2,2 м/с, т.е. почти в три раза на пахотных и фрезерных режимах d_{CP} практически остается неизменным.

Таким образом, испытания на разных типах почв показывают, что при обработке ротационным плугом основное влияние на степень крошения почвы оказывает подача s на нож. Однако снижение степени крошения при увеличении подачи происходит неравномерно. Изменение подачи с 0,085 м до 0,125 м приводит к увеличению величины d_{CP} на 16...17%, а дальнейшее увеличение подачи до 0,19 м – лишь на 5...6%. Это обстоятельство свидетельствует о необходимости строгого выбора величины подачи s в зависимости от вида обработки (основная или предпосевная) и от необходимой по агротребованиям степени крошения почвы.

Содержание пылевидных (эрозионно-опасных) частиц меньших или равных 0,25 мм после ротационного плуга, как на пахотных, так и на фрезерных режимах не превышает 8% или только на 2...3% больше, чем после лемешного плуга [70].

На рис. 4.19 показана зависимость степени крошения почвы K_{KP} от подачи s на нож ротационного плуга. Из графика видно, что на пахотных режимах с подачами $s = 0,185...0,205$ м степень крошения ротационного плуга близка к степени крошения лемешного плуга и составляет примерно 65%.

Следует отметить еще одну положительную особенность качества крошения при ротационной обработке почвы. На рис. 4.20 показаны кривые плотности распределения вероятностей степени крошения почвы, построенные по данным полевых испытаний.

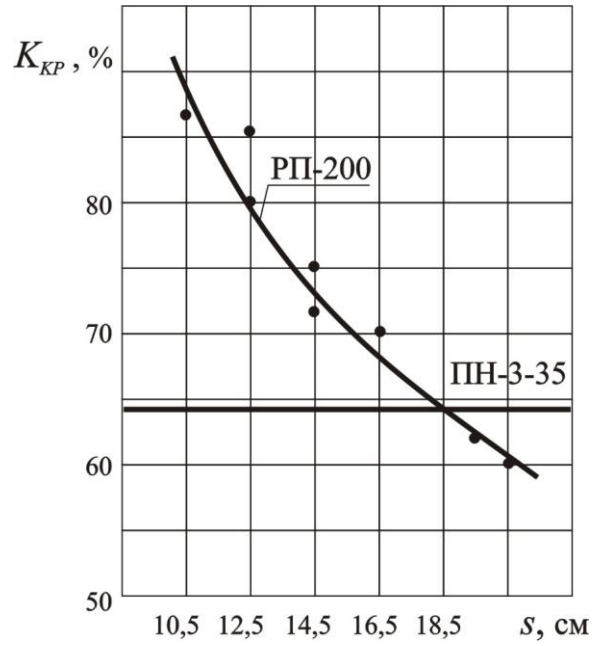


Рис. 4.19. Зависимость степени крошения K_{KP} почвы от подачи s на нож ротационного плуга в сравнении с лемешным плугом

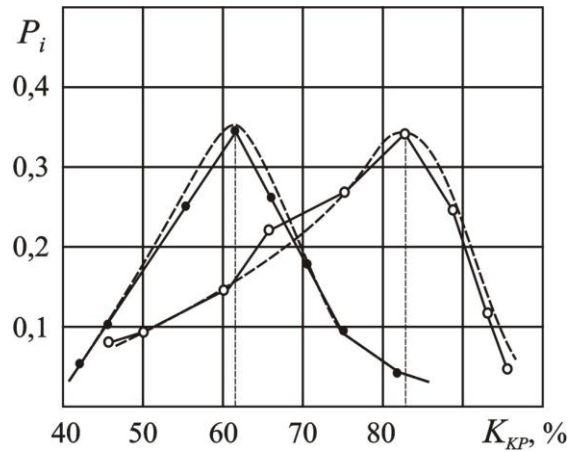


Рис. 4.20. Плотности распределения вероятностей степени крошения почвы: 1 – лемешный плуг; 2 – ротационный плуг

Плотности распределения выравниваются кривыми, близкими к нормальному закону с параметрами $m_x = 82,5\%$ и $\sigma_x = 6,25\%$ для ротационного плуга с подачей $s = 0,176$ м и $m_x = 61,2\%$ и $\sigma_x = 7,4\%$ для лемешного плуга. Согласно действующим агротребованиям принято, что плуги должны обеспечивать степень крошения не менее 70%. Тогда вероятность обработки поля с заданной степенью крошения составит [15] для ротационного плуга:

$$p = \Phi \frac{96,6 - 82,5}{6,25} - \Phi \frac{70,0 - 82,5}{6,25} = 0,96,$$

и для лемешного плуга

$$p = \Phi \frac{76,2 - 61,5}{7,4} - \Phi \frac{70,0 - 71,2}{7,4} = 0,21,$$

где Φ – функция Лапласа.

Из этих данных следует, что ротационный плуг на пахотном режиме ($s = 0,176$ м) обеспечивал заданную степень крошения (70%) на 96% всей обработанной площади, в то время как лемешный плуг в тех же условиях обеспечивал ту же степень крошения только на 21% обработанной площади.

Таким образом, данные фракционного анализа показывают, что ротационная обработка почвы дает не только более высокую степень крошения почвы, но и обеспечивает более высокую стабильность этого показателя.

Влияние степени крошения почвы на энергозатраты определяется по закону П.А. Ребиндера [46, 68, 69], согласно которому работа на дробление твердых тел складывается из работы A_s на образование новых поверхностей и на деформацию A_v некоторого объема тела:

$$A = A_s + A_v = k_s \Delta S + k_v V, \quad (4.8)$$

где k_S – удельная поверхностная энергия, зависящая от физико-механических свойств и значения параметров состояния дробимого материала (принимается для данного материала постоянной);

k_V – коэффициент пропорциональности, зависящий от прочностных свойств разрушаемых тел и по величине равный удельной объемной работе деформации;

ΔS – суммарная поверхность вновь образованных после дробления комков;

V – деформируемый объем тела.

Уравнение (4.8) является обобщающим все предшествующие теории дробления материалов, обзор которых дан в работе [46]. Так, теория Реттингера основана на том, что работа дробления прямо пропорциональна поверхности разделения (или обратной величине поперечника конечного материала). Теория Кирпичева-Кика основана на положении, что затраты энергии на дробление прямо пропорциональны объему или весу тела. М.Е. Мацепуро заключил, что теория Кирпичева-Кика в наибольшей степени соответствует крупному и среднему дроблению, а теория Реттингера – мелкому и тонкому измельчению. По обобщенной теории Ребиндера, работа разрушения затрачивается на упругие и пластические деформации и изменение поверхностной энергии при приращении поверхности разрушаемого тела. Из этого следует, что работа на разрушение значительно возрастает с увеличением степени разрушения (крошения).

Полагая коэффициенты k_S и k_V уравнения (4.8) постоянными, можно графически представить зависимость работы крошения почвы в соответствии с разными теориями (рис. 4.21).

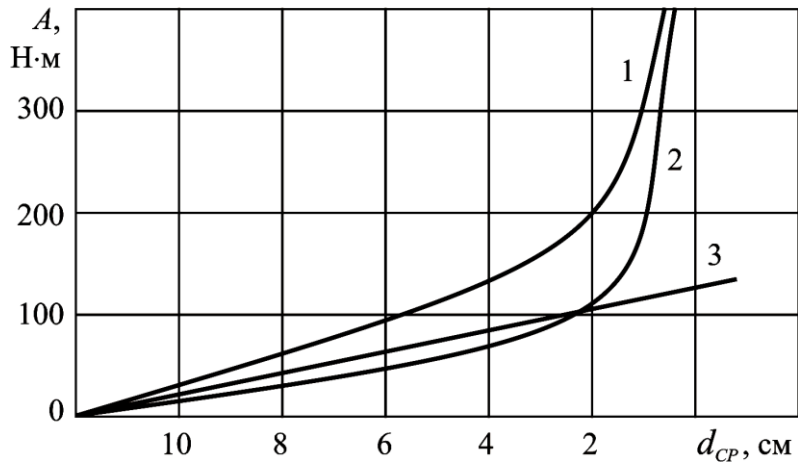


Рис. 4.21. Зависимость работы крошения A от размера d_{CP} почвенных частиц:
 1 – по закону Ребиндера; 2 – по закону Реттингера;
 3 – по закону Кирпичева-Кика

Из этих графиков следует, что работа дробления (крошения) до заданной дисперсности (среднего размера комка d_{CP}) растет по гиперболической кривой (согласно законам Ребиндера и Реттингера). Работа на объемное деформирование (по закону Кирпичева-Кика) изменяется по линейной зависимости. Полученные результаты подтверждены также работами Ю.С. Леонтьева [40].

Удельную работу объемной деформации можно определить из уравнения

$$k_v = \frac{\pi d_i^3 \sigma_{II}^2}{12E}. \quad (4.9)$$

Если подставить в это уравнение предел прочности при сжатии почвы $\sigma_{II} = 0,02 \text{ кгс/см}^2$ и $E = 14,96 \text{ кгс/см}^2$ по данным [64], то удельная работа деформации имеет небольшую величину и можно согласиться с

утверждением М.Д. Подскребко [64] о том, что основная доля работы на крошение почвы определяется работой, затрачиваемой на образование новых поверхностей, т.е. первым членом уравнения (4.8).

Это также подтверждается материалами монографии [71], где указывается, что определяющим параметром разрушения образцов камня является энергия, поглощенная при ударе. Если принять линейной зависимость вновь образованной поверхности от количества поглощенной энергии, то основная часть энергии на разрушение будет пропорциональна произведению обратной величины конечного размера частиц на их количественное содержание в продукте дробления (см. рис. 2.2).

Удельная поверхностная энергия k_S может быть определена по данным опытов разрушения комков почвы ударом. По данным [81], при наибольшей степени крошения, значение $k_S = 0,283 \cdot 10^{-3}$ кгс/см².

Определим закономерности изменения площади ΔS вновь образованных поверхностей.

Объем комка, полученного в результате дробления (крошения), примем приблизительно равным объему куба с ребром равным $0,8d_i$ [71]. Тогда внешняя поверхность вновь образованного комка будет равна

$$S_i = 6(0,8d_i)^2 \approx 5d_i^2. \quad (4.10)$$

Удельная поверхность, приходящаяся на единицу объема почвенного комка, выразится как

$$S'_i = \frac{S_i}{V_i} = \frac{5d_i^2}{0,5d_i^3} \approx \frac{10}{d_i}. \quad (4.11)$$

Из уравнения (4.11) следует, что между удельной поверхностью вновь образованных комков и их размером существует обратная зависимость, т.е. чем меньше размер комка, тем больше его удельная поверхность.

Полагая равномерным крошение всего обрабатываемого слоя почвы, и принимая массу Q_{Π} почвенной пробы как статистическую совокупность почвенных комков, найдем удельную поверхность комков, приходящуюся на единицу массы почвенной пробы

$$S_i'' = 10d_i^2 \frac{1}{\rho d_i^3} = \frac{10}{\rho} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_{\Pi}}. \quad (4.12)$$

Обозначим $\frac{Q_i}{Q_{\Pi}} = p_i$ - частота или долевой выход

соответствующей фракции, n - число фракций. Тогда суммарная поверхность вновь образовавшихся комков в почвенной пробе Q_{Π} составит

$$\Delta S = \frac{10}{\rho} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_{\Pi}} = \frac{10}{\rho Q_{\Pi}} \sum_{i=1}^n p_i. \quad (4.13)$$

Если заменить совокупность размеров комков всех фракций до и после крошения одним средневзвешенным комком, то до крошения имеем согласно [50]

$$D_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i p_i}{100}, \quad (4.14)$$

а после крошения

$$d_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i p_i}{100}. \quad (4.15)$$

С учетом двух последних формул

$$\Delta S = \frac{10}{Q_{\Pi}} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{d_i} \approx 10 \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{d_i} \approx \frac{10}{d_{CP}}. \quad (4.16)$$

С учетом имеющихся в естественно сложенной почве комков и глыб, а также комков, образованных после предварительного крошения почвы тяговыми рабочими органами, приращение поверхности почвенных комков составит

$$\Delta S = S_K - S_H, \quad (4.17)$$

где S_K и S_H – поверхности почвенных комков соответственно после обработки и до обработки.

Если ротационная почвообрабатывающая машина работает без предварительного рыхления почвы, то приращение поверхности вновь образованных комков равно

$$\Delta S = 10 \sum_{i=1}^n p_i \left(\frac{1}{d_{iK}} - \frac{1}{D_{iH}} \right) = 10 \left(\frac{1}{d_{CP}} - \frac{1}{D_{CP}} \right). \quad (4.18)$$

При установке на ротационной машине тяговых рабочих органов приращение поверхности вновь образованных комков равно

$$\Delta S = 10 \sum_{i=1}^n p_i \left(\frac{1}{d_{iK}} - \frac{1}{d_{iT}} - \frac{1}{D_{iH}} \right) = 10 \left(\frac{1}{d_{CP}} - \frac{1}{d_{iT}} - \frac{1}{D_{CP}} \right). \quad (4.19)$$

Подставляя значение ΔS в уравнение (4.8), найдем зависимость работы на крошение почвы всей ротационной комбинированной машиной шириной захвата B при работе на глубину a с подачей s :

$$A_s = 10k_s \sum_{i=1}^n p_i \left(\frac{1}{d_i} \right) aBs = 10k_s \frac{1}{d_{CP}} aBs. \quad (4.20)$$

Объем почвы до и после крошения остается постоянным, т.е.

$$V = \sum_{i=1}^n 0,5d_i^3 = 0,5d_{CP}^3 = \text{const}. \quad \text{Поэтому работа на деформацию}$$

почвенных комков приблизительно равна

$$A_v = 0,5k_v d_{CP}^3. \quad (4.21)$$

Полная работа на крошение почвы равна

$$A = 10k_s \frac{1}{d_{CP}} aBs + 0,5k_v d_{CP}^3. \quad (4.22)$$

Как следует из графиков рис. 4.17, полная работа на крошение (по теории Ребиндера) резко повышается при достижении определенной степени крошения почвы, т.е. с уменьшением средневзвешенного размера почвенного комка.

Мощность, необходимую для крошения почвы ротационной почвообрабатывающей машиной, определим из следующих соотношений.

Работа, затрачиваемая на крошение почвы при одном обороте ножевого барабана, равна

$$A = 2\pi M_{KP}, \quad (4.23)$$

где M_{KP} – приводной момент на валу барабана.

Тогда мощность на крошение выразится как

$$N_{КРОШ} = M_{KP}n = \frac{A}{2\pi} \quad (4.24)$$

или

$$N_{КРОШ} = \frac{30[0,5k_v d_{CP}^3 + 10k_s \left(\frac{1}{d_{CP}} - \frac{1}{D_{CP}} \right) aBs]v_o D}{2\pi}. \quad (4.25)$$

Выражение (4.24) связывает механические свойства почвенных комков (k_s , k_v), режимы работы (a , s , v) и конструктивные параметры ротационной почвообрабатывающей машины (B , D).

Удельную поверхностную энергию при разрушении почвенных комков ударом для получения оптимального фракционного состава, как

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

было установлено ранее, можно принять равной $k_S = 2,83 \cdot 10^{-3}$ Дж/см². Удельную работу объемной деформации k_V ориентировочно можно определить из уравнения (4.23) [72]. Для средних почвы значение k_V составляет $(4,5 \dots 6,0) \cdot 10^{-3}$ Дж/см³.

Используя данные фракционного анализа [56] определим работу и мощность на крошение почвы для ротационного плуга при условии $D = 0,8$ м; $B = 1,04$ м; $a = a_{II} = 0,20$ м. Результаты расчетов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Результаты расчетов мощности на крошение почвы

| v , м/с | s , м | d_{CP} , мм | D_{CP} , мм | N_V , кВт | N_S , кВт |
|-----------|---------|---------------|---------------|-------------|-------------|
| 1,33 | 0,126 | 18,7 | 169,2 | 0,65 | 60,7 |
| 1,12 | 0,190 | 37,9 | | 0,61 | 54,2 |
| 1,33 | 0,258 | 56,2 | | 0,85 | 47,4 |

Из данных таблицы следует, что мощность N_V на объемную деформацию комков почвы составляет незначительную величину (до 1% от мощности N_S на приращение вновь образуемых поверхностей), поэтому ее можно не учитывать, как указывал М.Д. Подскребко [64].

На рис. 4.22 показан график зависимости затрат мощности на крошение почвы в зависимости от средневзвешенного размера почвенного комка.

Из графика следует, что экспериментальные данные подтверждают расчетную зависимость: чем меньше средневзвешенный размер комка d_{CP} , тем выше затраты мощности на крошение почвы. Разница между расчетными и экспериментальными данными не превышает 10...15%.

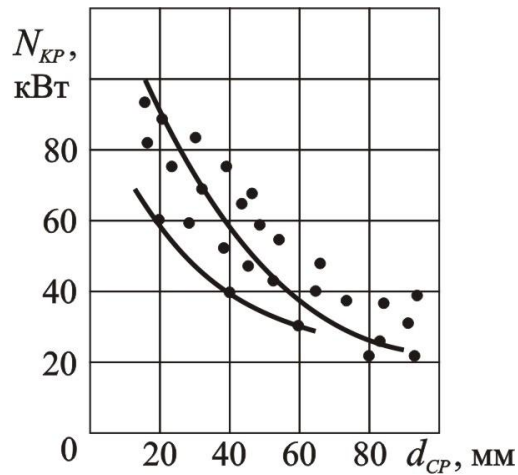


Рис. 4.22. График зависимости мощности на крошение почвы $N_{КРОШ}$ от размера комка d_{CP}

На рис. 4.23 приведены зависимости удельной энергоёмкости крошения почвы \mathcal{E} от средневзвешенного размера d_{CP} комка почвы для ротационного и лемешного плугов.

Из графиков следует, что с увеличением средневзвешенного размера комка почвы за счет увеличения подачи, величина удельной энергоёмкости ротационного плуга приближается к удельной энергоёмкости лемешного плуга.

Так, при одинаковой удельной энергоёмкости ротационный плуг обеспечивал значительно лучшее крошение почвы:

- при подаче $s = 0,172$ м у ротационного плуга $d_{CP} = 65 \dots 70$ мм, а у лемешного плуга $d_{CP} = 105 \dots 110$ мм;

- при подаче $s = 0,52$ м у ротационного плуга $d_{CP} = 80 \dots 110$ мм, а у лемешного $d_{CP} = 110 \dots 120$.

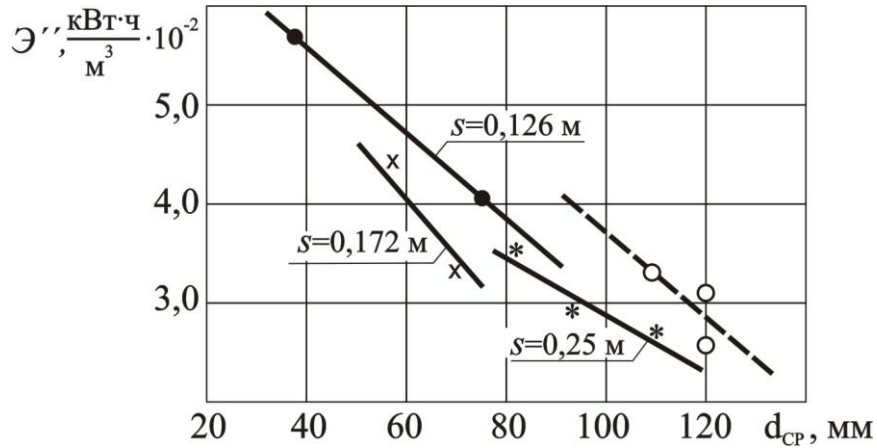


Рис.4.23. Зависимости удельной энергоёмкости \mathcal{E} крошения почвы от размера средневзвешенного комка d_{CP} для лемешного и ротационного плугов:

----- ПН-3-35; ————— ПР-200 ($a = a_{ДЛ} = 0,20$ м);
 1 – $s = 0,126$ м; 2 – $s = 0,25$ м; 3 – $s = 0,172$ м

Таким образом, данные по крошению почвы показывают, что при использовании ротационного плуга по сравнению с лемешным, мощность двигателя трактора на крошение почвы используется более рационально.

Глава 5. Основы теории комбинированных плужных корпусов

Большинство комбинированных плужных корпусов с вертикальным ротором можно свести к двум основным схемам (рис. 5.1):

- с укороченным лемехом и укороченным отвалом;
- с укороченным отвалом и лемехом нормальной ширины.

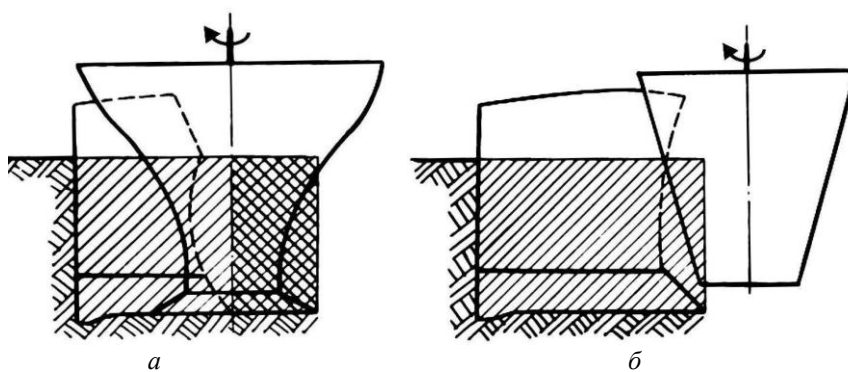


Рис. 5.1. Схемы комбинированных плужных корпусов:

a – с укороченным отвалом;

б – с укороченным отвалом и лемехом нормальной ширины

В первом случае для обеспечения оборота пласта форма ротора копирует отрезанную часть крыла отвала, а часть пласта, не подрезанная лемехом, отрезается тарельчатым диском, закрепленным на нижнем конце вала ротора [58].

Взаимодействие комбинированного плужного корпуса с почвой можно условно разделить на три фазы:

- подрезание и подъем пласта укороченным плужным корпусом;
- крошение пласта ротором;
- отбрасывание почвы ротором в борозду предыдущего прохода, с подобием оборота пласта.

Рассмотрим процессы, происходящие с пластом в каждой фазе.

5.1. Подрезание пласта и движение его по укороченному отвалу

Корпус и ротор участвуют в переносном движении вместе с плугом со скоростью v_{II} , однако, на данном этапе будем рассматривать только относительные траекторию и скорость пласта по отвалу.

Полагаем, что лемешно-отвальная поверхность корпуса имеет горизонтальные образующие и принадлежит к развертывающимся поверхностям [85].

Рассмотрим какую-либо точку M пласта, находящуюся на пересечении траектории пласта с полевым обрезом корпуса, т.е. в месте схода пласта с отвала. Проведем через точку M вертикальную P и горизонтальную Q плоскости, которые определяют углы установки корпуса. Для определения относительной скорости v_r этой точки проведем координатные оси XYZ , при этом ось OX направим в сторону поступательного движения корпуса, ось OY – перпендикулярно к стенке борозды, а ось OZ – перпендикулярно к дну борозды (рис. 5.2).

Тогда проекции относительной скорости любой точки пласта в момент схода его с отвала можно вычислить из следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= v_r \sqrt{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \gamma}; \\ v_y &= v_r \sin \alpha \sqrt{\sin^2 \gamma - \sin^2 \varepsilon}; \\ v_z &= v_r \sin \alpha \sin \varepsilon, \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

где α - угол между касательной плоскостью к лемешно-отвальной поверхности в точке M и дном борозды;

γ - угол между образующей отвальной поверхности и стенкой борозды;

ε - угол между касательной к траектории точки M и образующей отвальной поверхности.

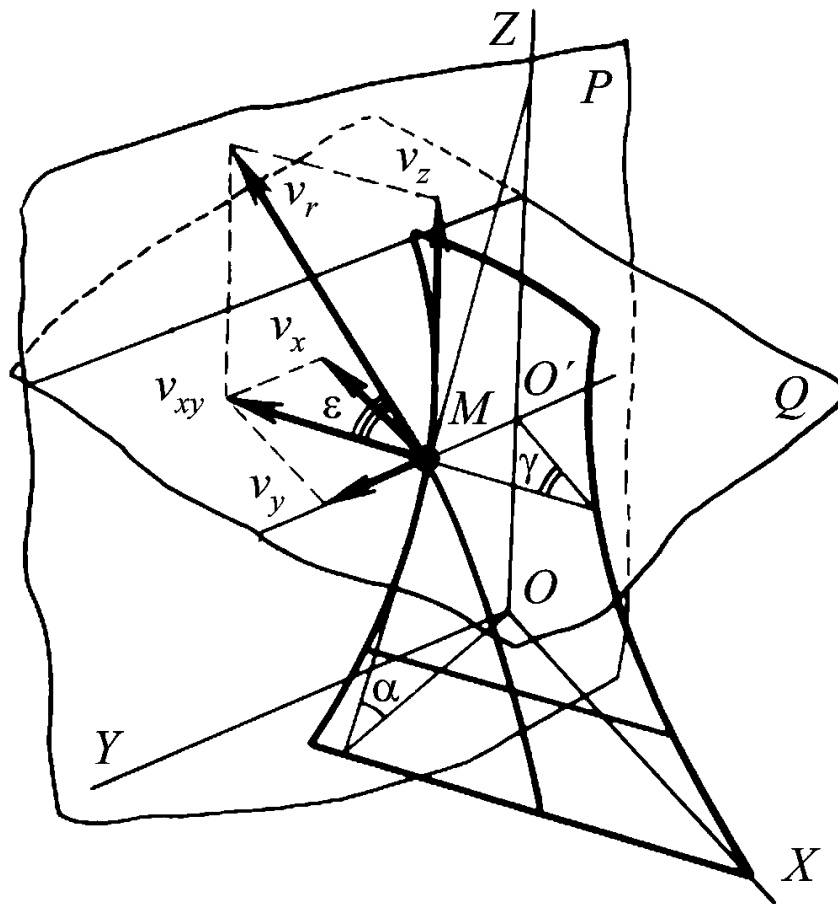


Рис. 5.2. Схема скоростей точки M пласта почвы, движущегося по укороченному отвалу

Относительная скорость v_r движения пласта по отвалу в общем случае не равна переносной скорости движения v_{II} , т.к. при движении

пласта по отвалу происходит его усадка (сжатие). Степень усадки оценивается отношением v_r/v_{II} , которое зависит от типа отвала и состояния почвы.

Пласт после схода с отвала будет совершать свободное падение до встречи с ротором. Принимая точку схода пласта с отвала за начало новой неподвижной системы координат $X'Y'Z'$ с осями, равнонаправленными осям OX, OY, OZ , составим дифференциальные уравнения свободного падения пласта:

$$m\ddot{x}' = 0; \quad m\ddot{y}' = 0; \quad m\ddot{z}' = -mg.$$

После интегрирования и подстановки значений постоянных интегрирования (при $t = 0, x = 0, y = 0, z = 0$), получим

$$\dot{x}' = 0; \quad \dot{y}' = 0; \quad \dot{z}' = -gt.$$

Тогда уравнения движение точки M в параметрической форме выразятся

$$\left. \begin{aligned} x' &= v_r \sqrt{1 - \sin^2 \alpha - \sin^2 \gamma} \cdot t; \\ y' &= v_r \sin \alpha \sqrt{\sin^2 \gamma - \sin^2 \varepsilon} \cdot t; \\ z' &= v_r \sin \alpha \sin \varepsilon t - g \frac{t^2}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (5.2)$$

Полученные выражения позволяют определить направление плоскости, в которой располагается относительная траектория движения точки M пласта, и проекцию этой траектории на плоскость XOY :

$$y = \operatorname{tg} \varepsilon'' x, \quad (5.3)$$

$$\text{где } \operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\sin \alpha \sqrt{\sin^2 \gamma - \sin^2 \varepsilon}}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \gamma}} - \text{угловой коэффициент}$$

проекции траектории точки M в горизонтальной плоскости.

Уравнение (5.3) позволяет определять направление поступления отдельных точек пласта на ротор.

По экспериментальным данным угол схода пласта с отвала составляет $\varepsilon = 35 \dots 39^\circ$.

Ротор располагается с правой стороны корпуса плуга по ходу движения и на некотором расстоянии от него. На роторе могут устанавливаться лопатки различной формы, расположенные горизонтально или наклонно к оси вращения (см. рис. 1.11). Кроме лопаток на образующих ротора могут устанавливаться различной формы зубья, прутки или планки. Эти элементы ротора участвуют в двух движениях:

- поступательном – переносом вместе с плугом со скоростью v_{II} и
- вращательном – относительно корпуса плуга с окружной скоростью v_O .

На рис. 5.3 показаны скорости и траектории элементов (зубьев) ротора относительно укороченного корпуса [68].

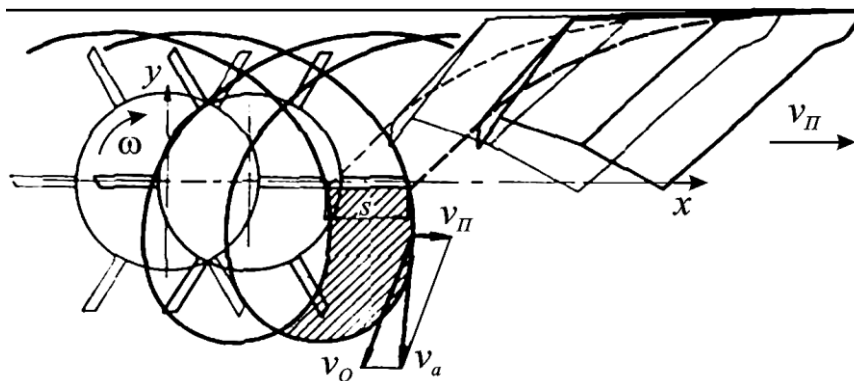


Рис. 5.3. Скорости и траектории элементов ротора относительно укороченного плужного корпуса

5.2. Уравнения движения элементов ротора

Для вывода уравнения движения ротора расположим систему координат OXY по его оси симметрии с началом в средней части, где радиус равен R_{CP} . Тогда, принимая, что ротор вращается с постоянной угловой скоростью ω , координаты конца зуба будут равны

$$\left. \begin{aligned} x &= v_{II}t + R_{CP} \cos \omega t; \\ y &= R_{CP} \sin \omega t, \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

где ωt – угол поворота зуба из начального положения за время t .

5.2.1. Абсолютные скорость и ускорение зуба

Взяв первую производную по времени t от уравнений (5.4), получим проекции скоростей зуба на координатные оси

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= v_x = v_{II} - \omega R_{CP} \sin \omega t = v_{II} - v_O \sin \omega t; \\ \dot{y} &= v_y = \omega R_{CP} \cos \omega t = v_O \cos \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

Вторая производная от уравнений (5.4) дает проекции ускорений

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= a_x = -v_O \omega \cos \omega t; \\ \ddot{y} &= a_y = -v_O \omega \sin \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

Модули абсолютной скорости и ускорения соответственно равны

$$v_a = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = v_{II} \sqrt{1 + \lambda^2 - 2\lambda \sin \omega t}, \quad (5.7)$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = R_{CP} \omega^2 = \frac{v_O^2}{R_{CP}}. \quad (5.8)$$

Из уравнения (5.7) следует, что абсолютная скорость зуба ротора или, условно, скорость резания – величина переменная, зависящая от угла поворота ротора.

Из уравнения (5.8) следует, что зубья ротора испытывают только центростремительное ускорение, направленное по радиусу к центру ротора.

Уравнения (5.4) в абсолютном движении ротора представляют кривую циклоиду. Подставим в эти уравнения $\lambda = \frac{v_o}{v_{II}}$, $\varphi = \omega t$ и $v_o = \omega R_{CP}$, получим уравнение циклоиды в параметрической форме

$$\left. \begin{aligned} x &= R_{CP} \left(\frac{\varphi}{\lambda} + \cos \varphi \right); \\ y &= -R_{CP} \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

Эти уравнения показывают, что на изменение формы циклоиды влияет только отношение $\lambda = \frac{v_o}{v_{II}}$, характеризующее кинематический режим работы ротора. При $\lambda < 1$ траектория зуба представляет собой укороченную циклоиду, не имеющую петли. Фактически при работе плуга всегда $\lambda > 1$, поэтому абсолютная траектория зубьев ротора имеет форму удлиненной циклоиды с петлей (рис. 5.3).

Авторы работы [68] предложили определять скорость схода пласта с укороченного отвала по формуле

$$v_r = v_{II} \sqrt{1 + \psi^2 - 2\psi \cos \varepsilon}, \quad (5.10)$$

где ψ - коэффициент усадки пласта;
 ε - угол, определяющий направление касательной к относительной траектории пласта (см. рис. 5.2).

Тогда абсолютная скорость зуба ротора или скорость резания выразится

$$v_a = v_{II} \sqrt{(1 + \psi^2 - 2\psi \cos \varepsilon) +} \quad (5.11)$$

$$+ v_O - 2v_O v_{II} \sqrt{1 + \psi^2 - 2\psi \cos \varepsilon} \sin \varphi.$$

На рис. 5.4 показан график зависимости скорости резания от угла поворота ротора при заданных значениях $v_{II} = 2,5$ м/с; $v_O = 4,6$ м/с; $R_{CP} = 0,2$ м и частоте вращения ротора $n_P = 220$ мин⁻¹.

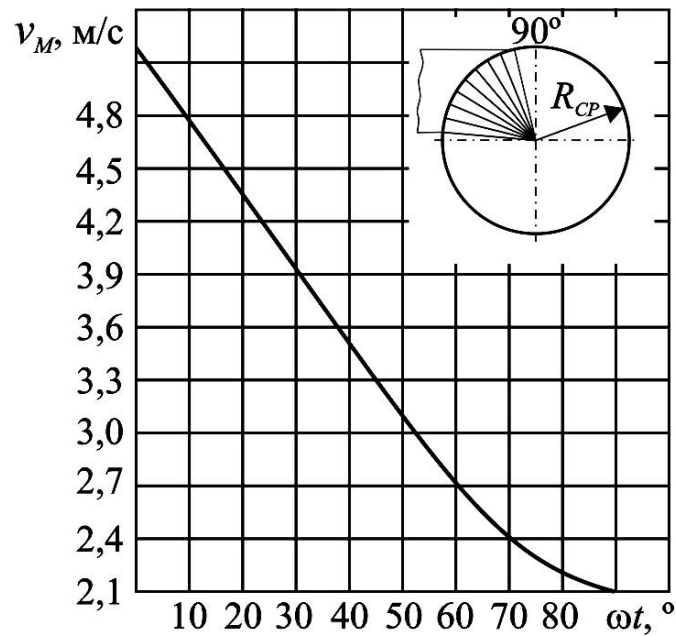


Рис. 5.4. Изменение скорости резания в зависимости от угла поворота ротора по данным [68]

Из графика следует, что скорость резания изменяется от максимального значения в начале врезания в пласт, до некоторого постоянного значения в конце резания (при $\varphi = \omega t = \frac{\pi}{2}$). В этот момент

скорость резания будет равна разности окружной скорости v_O и скорости поступательного движения v_{II} , т.е. $v_a = v_O - v_{II}$.

Если окружная скорость v_O ротора будет равна поступательной скорости v_{II} плуга, то пласт будет скользить по ротору. При соотношении $v_O < v_{II}$ пласт будет сгуживаться перед ротором. Для нормальной работы ротора необходимо, чтобы его окружная скорость была больше поступательной скорости $v_O > v_{II}$ [68].

5.2.2. Подача пласта на рабочий элемент ротора

Если рассмотреть движение двух соседних зубьев, вращающихся в одной горизонтальной плоскости, то траектория одного зуба будет в продольном направлении смещена относительно другой на величину s , называемую подачей (см. рис. 5.3):

$$s = x_2 - x_1 = \frac{2\pi v_{II}}{z\omega} \quad (5.12)$$

или

$$s = \frac{2\pi R_{CP} \lambda}{z}, \quad (5.13)$$

где z – число зубьев или лопаток в одной плоскости.

С учетом уравнения (5.11) и частоты вращения ротора

$$s = \frac{2\pi R_{CP}}{z} \cdot \frac{v_{II}}{v_O} \sqrt{1 + \psi^2 - 2\psi \cos \varepsilon}. \quad (5.14)$$

Величина подачи на один зуб (или любой другой элемент ротора – лопатку, пруток и т.п.) прямо пропорциональна скорости плуга v_{II} и обратно пропорциональна окружной скорости v_O ротора.

На рис. 5.5 показан график зависимости подачи s от числа зубьев z и $\frac{v_{II}}{v_O}$ при $R_{CP} = 0,2$ м.

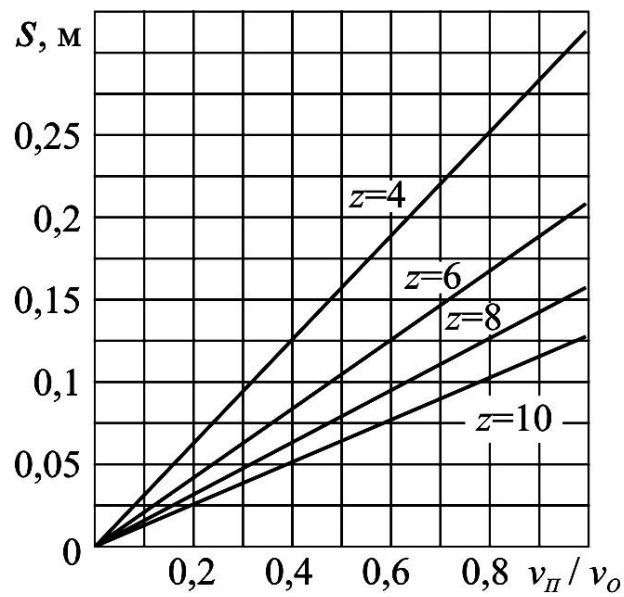


Рис. 5.5. Зависимость подачи от числа зубьев и отношения $\frac{v_{II}}{v_O}$

Толщина отрезаемой зубом стружки ориентировочно определяется по формуле:

$$\delta = s \cos \varphi. \quad (5.15)$$

Угол контакта ротора с пластом или угол, на котором происходит резание пласта, выражается зависимостью [68]:

$$\varphi_K = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{R_{CP} - a}{R_{CP}}, \quad (5.16)$$

где a – толщина пласта (глубина пахоты);

φ_2 и φ_1 – конечный и начальный углы работы ротора.

5.2.3. Число одновременно работающих зубьев

Число одновременно работающих зубьев (прутков) зависит от толщины пласта и общего числа зубьев на роторе:

$$z_{од} = \frac{\varphi_K z}{2\pi} \quad (5.20)$$

или

$$z_{од} = \frac{z}{2\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{R_{CP} - a}{R_{CP}} \right). \quad (5.21)$$

5.2.4. Площадь и объем срезанной стружки

Площадь F и объем V срезанной стружки определяются по зависимостям:

$$F = \delta s$$

или

$$F = s^2 \cos \varphi \left(\frac{2\pi v_{II}}{z\omega} \right)^2 = \frac{2\pi R_{CP} \lambda}{z}; \quad (5.17)$$

$$V = \delta ab, \quad (5.18)$$

или

$$V = \frac{60v_{II}}{zn_p} ab \cos \varphi, \quad (5.19)$$

где b – ширина пласта или ширина захвата корпуса плуга, м;
 n_p – частота вращения ротора, мин⁻¹.

5.3. Крошение пласта ротором

Рассмотрим процесс взаимодействия пласта с ротором (рис. 5.6). При подрезании пласта лемехом и движении его по укороченному отвалу, происходит разделение пласта на отдельные относительно крупные комки. На ротор поступает пласт с нарушенной монолитностью.

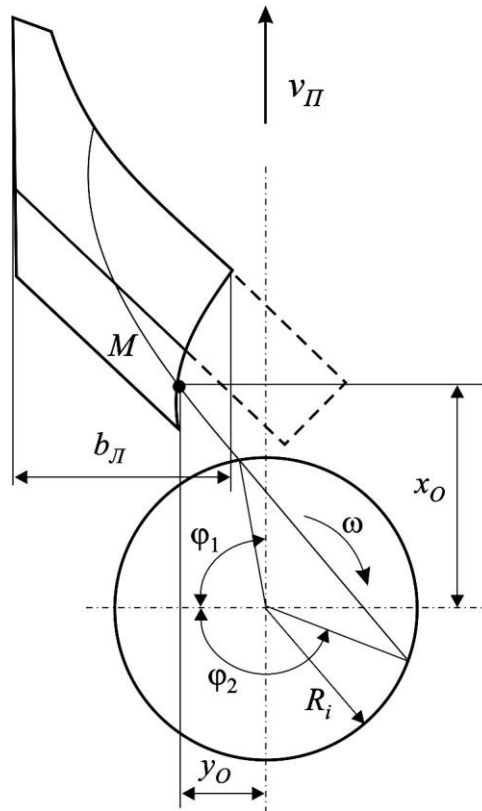


Рис. 5.6. Схема движения пласта относительно ротора где:
 b_L – ширина лемеха; x_O и y_O – координаты центра вращения ротора
 относительно точки M – схода пласта с отвала

Окончательное крошение комков и глыб пласта производит ротор. Действие ротора на пласт, сходящий с отвала, носит ударный характер, т.к. изменяется количество движения соударяющихся тел (ротора и пласта) на конечную величину за короткий промежуток времени. Импульс ударной силы достигает значительной величины, поэтому другими силами, например, силами трения можно пренебречь.

Физическая сущность процессов, происходящих при ударном крошении пласта, исследована недостаточно. Можно рассматривать комбинированный плужный корпус как своеобразную роторную дробилку, поэтому для описания крошения используем теорию ударного дробления материалов. Процесс крошения (дробления) можно упрощенно представить в следующем виде. Ударные силы вызывают в комках почвы накопление внутренней энергии упругих и пластических деформаций. Напряжения в комке возрастают до тех пор, пока в каком-либо месте, вследствие концентраций напряжений вокруг некоторого дефекта (микротрещины), они не превысят предела прочности материала. Тогда начинается лавинообразное развитие трещин, сопровождающееся перераспределением накопленной энергии, часть которой превращается в энергию вновь образованных поверхностей. Эта часть энергии является полезной энергией дробления. Другая часть энергии идет на сообщение скорости раскрошенным комкам и рассеивается в виде упругих и пластических деформаций комков, а также тепла и других видов энергии.

Процесс дробления материалов и крошения почвы можно рассматривать как с позиций классической механики, так и волновой. Классическая механика рассматривает приложение сил удара по центру инерции комка (прямой или косой удар), а сами комки могут считаться как абсолютно упругими, так и не вполне упругими.

Как уже было сказано, пласт поступает на ротор в виде крупных глыб и комков, а также массы мелких фракций. Поэтому разрушение комков почвы может происходить при следующих режимах:

1) При свободном ударе, т.е. в момент свободного падения комка. Этот вид разрушения является основным – передаваемая энергия ротора при свободном ударе комка зависит от условий соударения: оптимальным является случай, когда комок попадает на рабочую грань зуба или другого рабочего элемента ротора. Худшим случаем является тот, когда комок попадает на торец зуба – при этом комок отбрасывается без разрушения.

2) Разрушение комков при «мягком» ударе, когда крупные комки находятся в массе мелких или в рыхлой почве. В этом случае на ротор действует постоянное сопротивление пласта, а время удара будет более продолжительным [49].

По теории волновой механики действие ударной нагрузки не передается мгновенно на весь комок, а от нагруженной части (места контакта соударяющихся тел) распространяются с конечной скоростью волны напряжений и деформаций, образуя волновой процесс. Напряжение, возникающее в комке вследствие удара со скоростью v_0 , будет равно [34]

$$\sigma = v_0 \sqrt{E\rho}.$$

При неупругом ударе кинетическая энергия ротора расходуется на деформацию комков. Для ударного взаимодействия ротора с комком почвы это положение выразится следующим уравнением:

$$T = \frac{1}{2} \left[J(\omega_1^2 - \omega_2^2) + m(v_{n1}^2 - v_{n2}^2) \right], \quad (5.22)$$

где J – момент инерции ротора относительно оси вращения;
 ω_1 и ω_2 – угловые скорости ротора до и после удара;
 v_{n1} и v_{n2} – проекции скорости комка v_r на нормаль удара до и после удара,
 m – масса комка.

Рассматривая почву как упругопластическое тело, введем коэффициент восстановления при ударе [89]

$$k_B = \frac{v_{n2} - \omega_2 R_i}{\omega_1 R_i - v_{n1}}, \quad (5.23)$$

где R_i – текущий радиус ротора в данном сечении.

Используя уравнение моментов количества движения относительно оси вращения ротора, получим

$$mR_i(v_{n2} - v_{n1}) = J(\omega_2 - \omega_1). \quad (5.24)$$

После преобразований последних уравнений получим

$$T = \frac{1}{2} \frac{Jm(1 - k_B^2)(v_{n1} - \omega_1 R_i)^2}{J + mR_i^2}. \quad (5.25)$$

Разность скоростей $v_{n1} - \omega_1 R_i$ представляет скорость соударения комка почвы с рабочими элементами ротора. Рассмотрим взаимодействие зуба ротора с комком почвы, полагая, что удар происходит в горизонтальной плоскости, в которой расположены составляющие относительной скорости пласта v_x и v_y и окружная скорость ротора $\omega_1 R_i$.

Определим основные зависимости ударного взаимодействия для ротора, оснащенного зубьями (рис. 5.7).

Величины скоростей v_x и v_y комка почвы до удара о зуб определяется по уравнениям (5.1). Проекция этих скоростей на нормаль удара $n-n$ равна

$$v_{n1} = v_y \sin \varphi_i - v_x \cos \varphi_i,$$

где φ_i – угол поворота ротора, соответствующий моменту встречи зуба с пластом почвы.

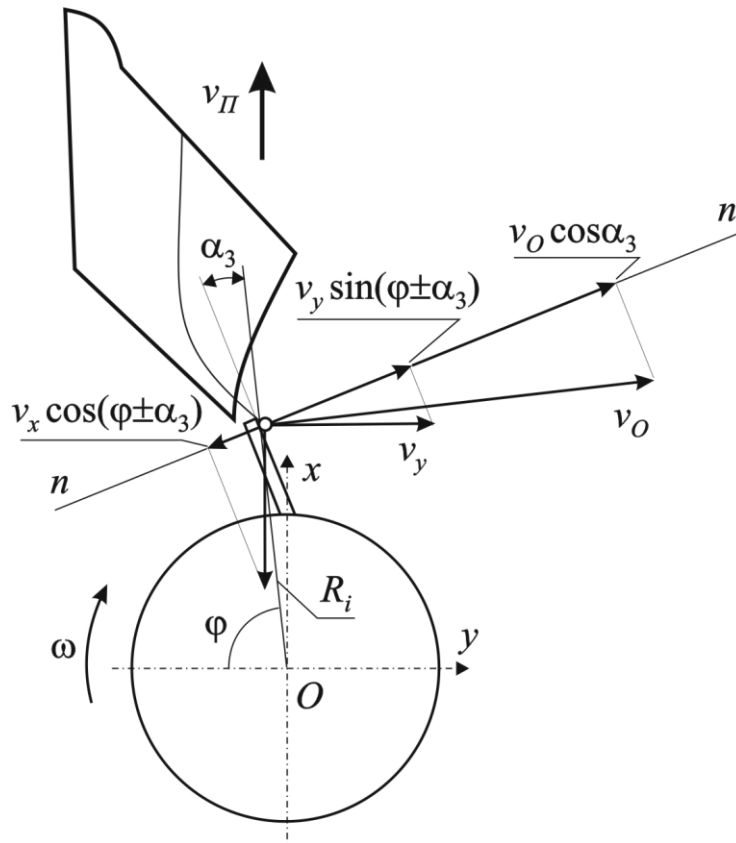


Рис. 5.7. Схема соударения комка почвы и зуба ротора

Определим скорость соударения для трех положений зуба: радиального, отклоненного назад и отклоненного вперед по направлению вращения ротора. Для первого случая относительная скорость соударения равна

$$v_{y\partial} = v_O - v_{n1} = \omega_1 R_i - v_x \cos \varphi_i + v_y \sin \varphi_i. \quad (5.26)$$

Для второго и третьего случаев относительная скорость соударения равна

$$v_{y\partial} = \omega_1 R_i \cos \alpha_3 - v_x \cos(\varphi_i + \alpha_3) + v_y \sin(\varphi_i - \alpha_3). \quad (5.27)$$

где α_3 – угол отклонения зуба (при отклонении назад берется знак «+», а при отклонении вперед – знак «-»).

Для определения величин углов φ_i следует найти точки пересечения траекторий точек пласта с окружностью ротора на соответствующей высоте по уравнению (5.3), либо графически следующим образом. На горизонтальной проекции отвала для образующих, расположенных по высоте через каждые 25 мм от дна борозды, проводится вектор скорости $\bar{v}_{xy} = \bar{v}_x + \bar{v}_y$ и находится пересечение его направления с соответствующей окружной скоростью зубьев, расположенных на той же высоте от дна борозды. Соединяя эти точки с осью вращения ротора, получаем значение углов φ_i , при которых происходит встреча зуба с пластом почвы, сходящим с отвала.

На рис. 5.8 показана расчетная зависимость скорости удара $v_{y\partial}$ от высоты расположения зубьев от дна борозды H при различных вариантах отклонения зуба.

График построен для частоты вращения ротора $n_P = 220 \text{ мин}^{-1}$. Углы отклонения зубьев приняты $\alpha_3 = 0^\circ, 15^\circ$ и 30° . Из графика следует, что скорость соударения $v_{y\partial}$ для всех вариантов расположения зубьев меньше, чем окружная скорость ротора v_0 . При отклонении зубьев назад на $\alpha_3 = 15^\circ$ скорость соударения несколько выше, чем при радиальном расположении зубьев. Дальнейшее отклонение зубьев назад до $\alpha_3 = 30^\circ$ приводит к снижению скорости $v_{y\partial}$. Отклонение зубьев вперед по направлению вращения ротора на любой угол приводит к снижению $v_{y\partial}$ по сравнению с радиальным размещением зубьев (изменение $v_{y\partial}$ для этого случая не показано на графике).

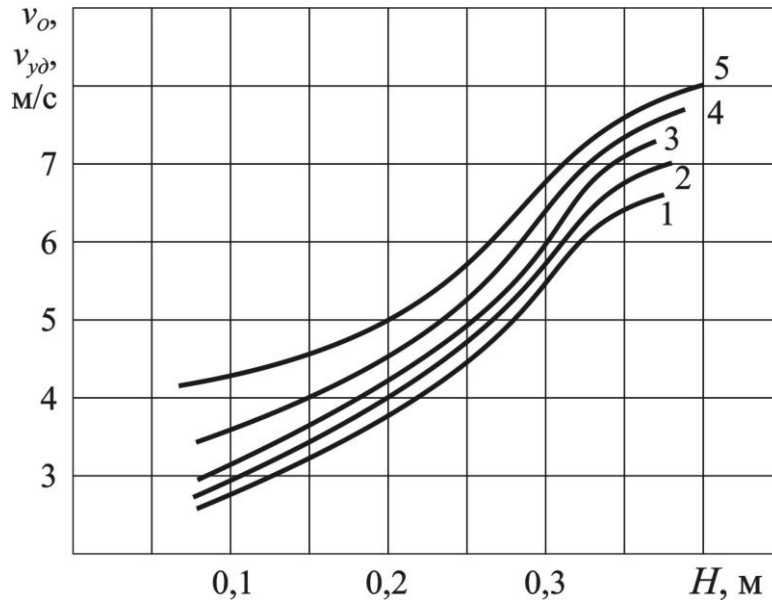


Рис. 5.8. Зависимость скорости $v_{y\partial}$ (1-4) и v_0 (5) от высоты H при поступательной скорости v_{Π} равной 1 м/с (4) и 2 м/с (1-3) и углах α_3 отклонения зубьев: 1 - 30° ; 2, 4 - 0° ; 3 - 15°

Как следует из уравнения (5.27), наибольшая скорость соударения, а, следовательно, и наибольшая деформация комков почвы, будет при максимальной разнице относительных скоростей пласта и окружной скорости ротора.

Определим минимальную скорость соударения, необходимую для разрушения почвенных комков, поступающих на ротор. Потеря кинетической энергии вращающегося ротора в результате удара о пласт почвы выражается уравнением (5.4). Энергию, затраченную на деформацию почвы, можно определить, руководствуясь следующими положениями [30]. Как и прежде, полагаем, что удар зуба по комку почвы происходит в горизонтальной плоскости. Проекция скорости на нормаль

удара равна v_{n1} . Примем, что распределение напряжений в комке изменяется по линейной функции [59], т.е.

$$\sigma_x = \alpha x / l, \quad (5.28)$$

где σ – максимальное напряжение в месте контакта зуба с комком;
 x – расстояние от свободного конца комка;
 l – длина комка почвы.

Работа деформации элемента dx комка равна

$$dA = \frac{\sigma^2}{2l^2} F \cdot \frac{x^2 dx}{E},$$

где F – поперечное сечение комка.

Полная работа деформации равна

$$A = \frac{\sigma^2 Fl}{6E} \cdot \frac{\sigma^2 m}{\rho}. \quad (5.29)$$

где $m = Fl\rho$ – масса комка.

Совместно решая уравнения (5.25) и (5.29), найдем

$$\sigma = \sqrt{\frac{3EJ(1-k_B^2)(v_{n1} - \omega_1 R_i)^2 \rho}{J + mR_i^2}}. \quad (5.30)$$

Обозначив $v_{KP} = v_{n1} - \omega_1 R_i$ и подставив в формулу (5.29) предельное значение напряжения σ_B для почвы, найдем критическое значение скорости удара, при которой произойдет разрушение комков почвы

$$v_{KP} = \sigma_B \sqrt{\frac{J + mR_i^2}{3EJ(1-k_B^2)\rho}}. \quad (5.31)$$

Момент инерции ротора может быть измерен одним из известных методов [89]. Методом падающего груза определено, что момент инерции

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

для комбинированных плугов конструкции ВИСХОМ для роторов с зубьями $J_3 = 0,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, а для роторов с лопатками $J_L = 0,17 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

В табл. 5.1 приведены расчетные значения v_{KP} для зубового ротора (почва с плотностью $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ и модулем упругости $E = 2,0 \text{ МПа}$) при $k_B = 0$ в зависимости от массы комков m , для двух значений $\sigma_B = 0,3 \text{ МПа}$ и $\sigma_B = 0,5 \text{ МПа}$.

Таблица 5.1

Расчетные значения критической скорости удара

| Масса комка m , кг | Скорость удара v_{KP} , м/с | |
|----------------------|-------------------------------|------------------------------|
| | $\sigma_B = 0,3 \text{ МПа}$ | $\sigma_B = 0,5 \text{ МПа}$ |
| 0,01 | 4,02 | 6,72 |
| 0,5 | 4,48 | 7,49 |
| 1,0 | 4,98 | 8,32 |
| 2,0 | 5,87 | 9,81 |

Из сопоставления графика на рис. 5.8 и данных табл. 5.1 следует, что при заданных параметрах и режимах работы ротора могут разрушаться комки почвы, имеющие предельное значение σ_B до $0,3 \text{ МПа}$ и массу не более $0,5 \text{ кг}$. Для крошения более прочных и крупных комков необходимо увеличивать частоту вращения ротора и, следовательно, его окружную скорость. Этот вывод необходимо подтвердить экспериментально (см. ниже).

Предельную скорость удара рабочих элементов ротора по комку почвы для его разрушения можно также определить с позиций теории дробления материалов, что позволит более детально раскрыть механизм крошения пласта.

Введем понятие степени дробления ξ почвы как отношения начального диаметра D комка поступающего на ротор, к конечному диаметру d комка сходящего с ротора после удара, т.е. $\xi = \frac{D}{d}$. Диаметры D и d комков определяются экспериментальной оценкой фракционного состава почвы, по результатам ситового гранулометрического анализа [76].

Размер комков принято представлять в виде куба с ребром, равным $0,8 D$, либо в виде шара с диаметром D [71], который определяется по одной из формул [50]:

$$D = \frac{l + b + h}{3} \text{ или } D = \sqrt[3]{lbh}, \quad (5.33)$$

где l, b и h – длина, ширина и толщина комка почвы.

Объем комка равен

$$V = 0,5D^3. \quad (5.34)$$

Площадь поверхности комка, выраженная через его размер, равна

$$S = 6(0,8D)^2 \approx 4D^2. \quad (5.35)$$

Удельная поверхность комка (на единицу объема) равна

$$S_y = \frac{4D^2}{0,5D^3} = \frac{8}{D}. \quad (5.36)$$

Так как $V = G/\rho$, м³, и $D = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$, то удельная поверхность на единицу веса комка равна [50]

$$s = \frac{S}{G}, \text{ м/кг,}$$

где G – средний вес комка.

В результате фракционного анализа почвы определяются средневзвешенные размеры начального и конечного комков

$$d_{CP} = \sum_{i=1}^n d_i p_i / 100, \text{ мм}, \quad (5.37)$$

где d_i – средний размер отверстий смежных сит, мм;
 p_i – частота данной фракции, %.

Изучением закономерностей процесса дробления материалов занимались известные ученые Ф. Кик, В.А. Кирпичев, А.К. Рундквист, П.А. Ребиндер [69]. В соответствии с законом Кирпичева-Кика, частицы разрушаемого материала распадаются на геометрически себе подобные, поэтому можно проследить следующие закономерности процесса крошения. Если для получения заданной степени крошения ξ однократного ударного воздействия на комок недостаточно, то удар производится необходимое число раз для получения более мелких, но геометрически подобных частиц.

Поскольку объем материала каждый раз остается неизменным, то согласно теории Кирпичева-Кика затраты энергии на дробление при каждом ударе будут одни и те же, если степень дробления также остается постоянной. Обозначим число повторных ударов по комку шарообразной формы для уменьшения его размеров от D до d через y , тогда согласно [25] можно записать

$$\frac{D^3}{d^3} = x^4 \text{ или } y = \frac{\lg \frac{D^3}{d^3}}{\lg x}, \quad (5.38)$$

где x – число частиц, на которое раздробился (раскрошился) комок, при однократном ударе.

Работу, необходимую на дробление почвы до заданной степени крошения, согласно [9] можно представить в следующем виде

$$A = k_1 y = k_1 \frac{D^3}{d^3} \lg \frac{D^3}{d^3}, \quad (5.39)$$

где k_1 – удельный расход энергии при однократном ударе (распаде) единицы объема материала.

Преобразовав последнее выражение, получим

$$A = k_2 \lg \frac{D^3}{d^3} = k_2 \lg \xi, \quad (5.40)$$

где $k_2 = k_1 / \lg x$ - коэффициент, численно равный работе упругих и пластических деформаций комков почвы.

С другой стороны, величина k_2 равна полной работе деформации единицы объема комка почвы

$$k_2 = \frac{\pi D^3 \sigma_B^2}{12E}, \quad (5.41)$$

где σ_B – предел прочности почвы.

После преобразований уравнения (5.41), получим

$$A = \frac{\pi \sigma_B^2 D^3}{4E} \lg \xi. \quad (5.42)$$

Согласно классической механике, кинетическая энергия, потерянная ротором при ударе о пласт почвы и расходуемая на деформацию комков почвы, может быть выражена уравнением

$$A_{y\partial} = \frac{Mm}{2(M+m)} (1 - k_B^2) v_{y\partial}^2, \quad (5.43)$$

где $M = \frac{J}{R_i^2}$ - приведенная к точке удара масса ротора.

В силу равенства $A = A_{y\partial}$ можно записать

$$\frac{Mm}{2(M+m)}(1-k_B^2)v_{y\partial}^2 = \frac{\pi\sigma_B^2 D^3}{4E} \lg \xi. \quad (5.44)$$

После соответствующих преобразований найдем минимальную скорость удара, необходимую для разрушения исходного почвенного комка

$$v_{y\partial} = \sigma_B \sqrt{\frac{\pi D^3 \rho + 6gM}{2EM\rho(1-k_B^2)}} \lg \xi. \quad (5.45)$$

Для почв с характеристикой $\sigma_B = 0,3$ МПа, $E = 5,0$ МПа, $\rho = 1600$ кг/м³, $k_B = 0$ скорость $v_{y\partial}$, рассчитанная по уравнению (5.45), равна 4,5 м/с, что примерно соответствует скорости $v_{y\partial}$, определенной ранее по уравнению (5.27). Это свидетельствует об адекватности принятых теоретических положений.

Из уравнения (5.45) выразим степень крошения почвы

$$\xi = 10k'v_{y\partial}^2, \quad (5.46)$$

где коэффициент k' равен

$$k' = \frac{2EM\rho(1-k_B^2)}{3\sigma_B^2 \pi D^3 \rho + 6gM}. \quad (5.47)$$

Из уравнений (5.46) и (5.47) следует, что степень крошения почвы зависит от режимов работы ротора (M, v_0), механических свойств почвы (σ_B, E, k_B), массы комков m и скорости $v_{y\partial}$ взаимодействия рабочих элементов ротора с комком почвы. На рис. 5.9 представлены графики зависимостей степени ξ крошения в функции $\sigma_B, E, k_B, v_{y\partial}, m, D$.

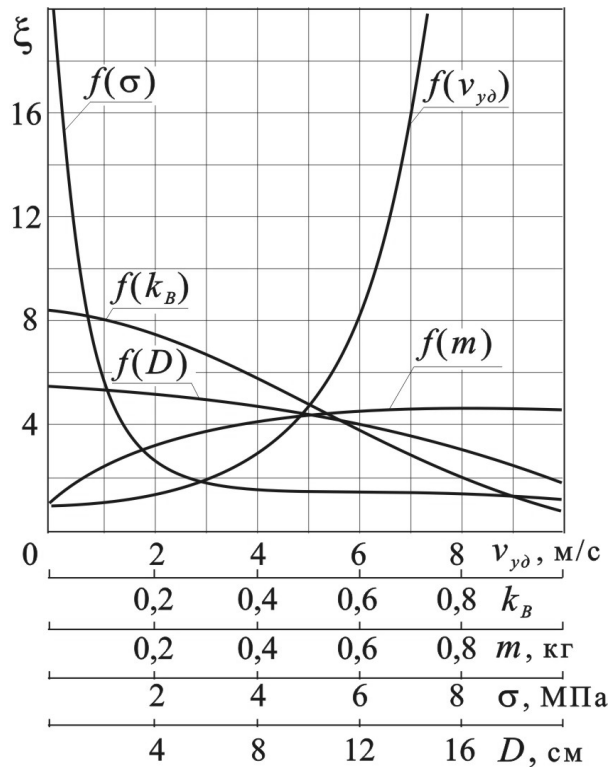


Рис. 5.9. Зависимости степени крошения ξ почвы от параметров ротора M , механических показателей почвы (σ_B , k_B), величины исходных размеров комков (D и m) и скорости $v_{\gamma\delta}$

Из графиков следует, что с увеличением упругости комка почвы (увеличение k_B) степень крошения ξ уменьшается с 8 до 2 (при этом коэффициент восстановления повышается с 0 до 1). Степень крошения ξ незначительно уменьшается также при увеличении первоначального размера D и массы m комка.

Наиболее значительное влияние на степень крошения оказывают скорость $v_{\gamma\delta}$ воздействия зубьев ротора на комки почвы, а также

механическая прочность σ_B комков. Увеличение скорости v_{yd} с 0 до 7 м/с повышает степень крошения с 1 до 16, а повышение предельного напряжения σ_B с 1,0 МПа до 6,0 МПа снижает степень крошения с 8 до 2. Однако уже при $\sigma_B > 0,3$ МПа степень крошения остается практически постоянной и равной примерно 2.

Как было показано выше (уравнение (5.26)), скорость v_{yd} зависит от разности окружной скорости ротора и проекций относительной скорости пласта на нормаль удара. Следовательно, для повышения степени крошения пласта необходимо обеспечить оптимальную угловую скорость ротора.

Для проверки полученных теоретических выводов необходимо проведение экспериментальных исследований на различных типах почв с учетом изменения параметров и режимов работы комбинированных плужных корпусов.

5.4. Отбрасывание почвы ротором комбинированного плужного корпуса

Под воздействием элементов ротора (зубьев, лопаток и т.п.) комки почвы отбрасываются в борозду предыдущего прохода плуга. Ширина полосы рассеивания и дальность отброса комков определяют перемешивание слоев почвы, заделку растительных остатков, а также минеральных и органических удобрений и выравнивание поверхности поля.

5.4.1. Отбрасывание почвы зубовым ротором

Существенное влияние на отбрасывание комков почвы оказывает положение зуба относительно его радиуса. Ранее (см. рис. 5.7) было

установлено, что отклонение зуба назад от направления вращения оказывает наибольшее влияние на скорость $v_{уд}$, а, значит, и дальность отбрасывания.

Определим оптимальные положения и режимы работы зубьев ротора. Для этого рассмотрим схему, приведенную на рис. 5.10.

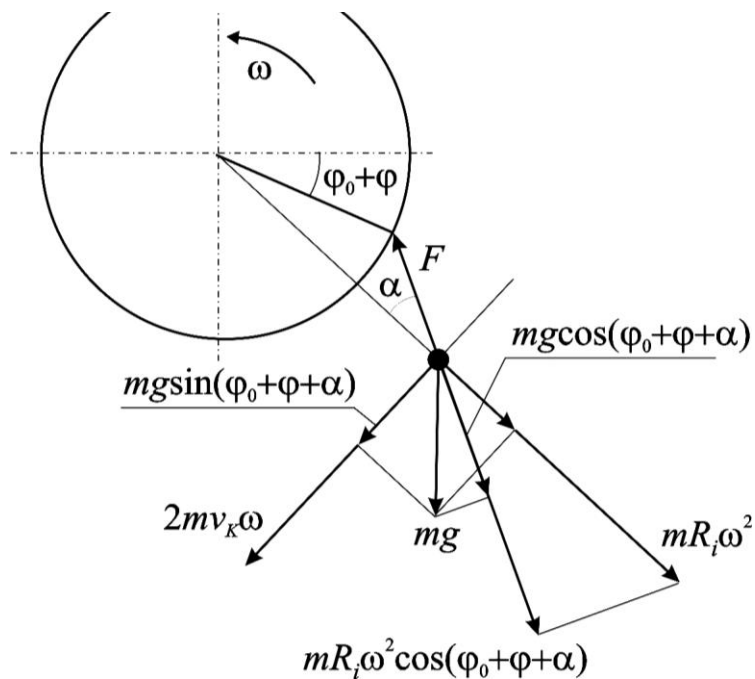


Рис. 5.10. Схема сил, действующих на комоч почвы при взаимодействии с зубом ротора

На комоч почвы, находящийся в плоскости зуба, действуют следующие силы:

1. Сила тяжести mg .
2. Центробежная сила $-mR_i\omega^2$, действующая в направлении радиуса, которую можно разложить на касательную

$mR_i\omega^2 \cos(\varphi_0 + \varphi - \alpha)$ и нормальную $mR_i\omega^2 \sin(\varphi_0 + \varphi + \alpha)$ к плоскости зуба составляющие.

3. Сила Кориолиса, величина которой равна $-2m\omega v_K$, где v_K – скорость относительного движения комка по плоскости зуба; направление этой силы перпендикулярно направлению относительной скорости v_K и ориентировано в сторону обратную направлению вращения зуба [10].

4. Сила трения, которая выражается следующим уравнением:

$$F = f[2m\omega v_K + mR_i\omega^2 \sin \alpha + mg \sin(\varphi_0 + \varphi - \alpha)].$$

В приведенных выражениях обозначены:

α - угол наклона зуба относительно радиуса ротора;

$\varphi_0 + \varphi$ - угол поворота зуба (φ_0 - начальный и φ - текущий углы);

f – коэффициент трения.

В работе [3] приведено уравнение результирующей всех действующих сил и получена зависимость для оптимального угла α отклонения зуба от радиуса, который в общем случае является функцией следующих переменных: $\alpha = f(R_i, \varphi, \varphi_0, \omega, f)$.

Оказалось, что величина угла α отклонения зуба зависит от геометрических параметров ротора (R_i), его режимов работы (ω), коэффициента трения f почвы о зуб. По данным автора [3], при коэффициенте трения $f = 0,6$ угол $\alpha = 19,5^\circ$, а при $f = 0,8$ угол $\alpha = 23^\circ$, что примерно совпадает с нашими рекомендациями, приведенными выше.

Дальность полета комков, отбрасываемых зубьями ротора, будет зависеть от их абсолютных скоростей в момент схода с зуба. Для определения частоты вращения ротора, обеспечивающей надежный сход частиц с зубьев, рассмотрим схему на рис. 5.11.

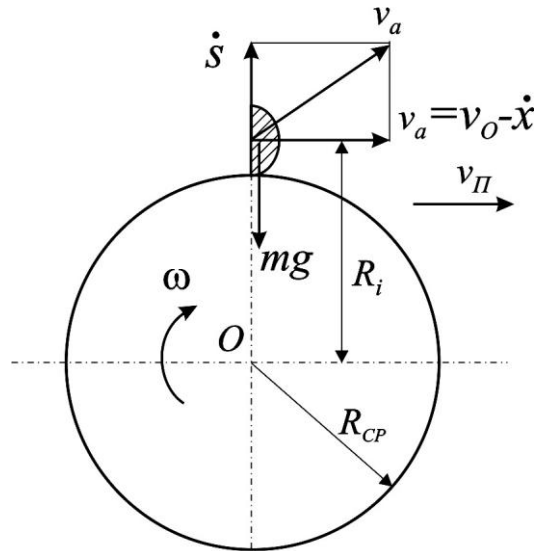


Рис. 5.11. Схема для вывода зависимости частоты вращения ротора

Примем, что зубья ротора расположены радиально, а комок почвы расположен на расстоянии R_i от центра вращения O . Относительная скорость комка по зубу равна \dot{s} , тогда переносная скорость комка равна

$$v_e = \dot{x} - v_{\Pi}, \quad (5.48)$$

где \dot{x} - горизонтальная проекция скорости зуба; v_{Π} - поступательная скорость плуга.

Абсолютная скорость комка равна

$$v_a = \sqrt{(\dot{x} - v_{\Pi})^2 + \dot{s}^2}. \quad (5.49)$$

Кинетическая энергия комка выразится [54]

$$T = m \frac{v_a^2}{2} = \frac{m}{2} [(\dot{x} - v_{\Pi})^2 + \dot{s}^2]. \quad (5.50)$$

Для составления дифференциального уравнения движения комка воспользуемся уравнением Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial T}{\partial x} \right) = Q_x; \quad (5.51)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{s}} - \frac{\partial T}{\partial s} \right) = Q_s, \quad (5.52)$$

где Q_x и Q_s – обобщенные силы.

$$\text{Так как } \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} = m(\dot{x} - v_{II}); \quad \frac{\partial T}{\partial s} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{s}} = m\dot{s}$$

уравнения (5.51) и (5.52) примут вид

$$m\ddot{x} = Q_x; \quad m\ddot{s} = Q_s. \quad (5.53)$$

Для определения обобщенных сил применим принцип возможных перемещений

$$\left. \begin{aligned} \delta W_x &= Q_x \delta x = N \delta x; \\ \delta W_s &= Q_s \delta s = (-mg - fN) \delta s. \end{aligned} \right\}$$

Отсюда

$$\left. \begin{aligned} Q_x &= N; \\ Q_s &= -mg - fN, \end{aligned} \right\} \quad (5.54)$$

где N – нормальная реакция зуба; f – коэффициент трения комка о зуб.

Примем, что комки сходят с зубьев при их вертикальном положении, тогда

$$\begin{aligned} x &= R_{CP} \sin \omega t; \\ \dot{x} &= R_{CP} \omega \cos \omega t; \\ \ddot{x} &= -R_{CP} \omega^2 \sin \omega t. \end{aligned}$$

С учетом системы уравнений (5.54) выражения (5.53) имеют вид

$$-mR_{CP}\omega^2 \sin \omega t = N;$$

$$m\ddot{s} = -mg - fN$$

или

$$\ddot{s} = -R_{CP}\omega \cos \omega t - g. \quad (5.55)$$

После интегрирования и определения произвольной постоянной при $t = 0$, $\dot{s} = \dot{R}_i$ получим

$$\dot{s} = \dot{R}_i + fR_{CP}\omega(1 - \cos \omega t) - gt. \quad (5.56)$$

После второго интегрирования и подстановки величины произвольной постоянной при $t = 0$, $s = R_i - R_{CP}$ получим

$$s = R_i - R_0 + \dot{R}_i + fR_{CP}\omega t(1 - \sin \omega t) - \frac{gt^2}{2}. \quad (5.57)$$

Из уравнения (5.57) следует, что для перемещения комка и его отбрасывания необходимо, чтобы

$$\dot{s} > 0$$

или

$$\dot{R}_i + fR_{CP}\omega(1 - \cos \omega t) - gt > 0. \quad (5.58)$$

Это условие должно соблюдаться при $\omega t = \frac{\pi}{2}$ или $t = \frac{\pi}{2\omega}$.

Для этого момента времени уравнение (5.58) запишется в виде

$$\dot{R}_i + fR_{CP}\omega - \frac{g\pi}{2\omega} > 0. \quad (5.58)$$

Отсюда можно определить минимальное значение угловой скорости ротора, обеспечивающее отброс комков почвы

$$\omega = \frac{\dot{R}_i}{fR_{CP}} + \sqrt{\frac{\dot{R}_i^2}{fR_{CP}} + \frac{\pi g}{fR_{CP}}}. \quad (5.59)$$

Если принять, что начальная относительная скорость комка по зубу равна нулю ($\dot{R}_i = 0$), то получим

$$\omega = \sqrt{\frac{\pi g}{f R_{CP}}} . \quad (5.60)$$

Примем $f = 0,6$ и $0,8$; $R_{CP} = 0,15$ м, тогда получим $\omega = 16 \text{ с}^{-1}$ и $\omega = 18,5 \text{ с}^{-1}$ или частоты вращения ротора $n = 160 \text{ мин}^{-1}$ и $n = 185 \text{ мин}^{-1}$.

Следует отметить, что полученные значения угловой скорости ротора являются весьма приблизительными, т.к. не учитывают массу отбрасываемой почвы, сопротивление воздуха и ряд других факторов.

5.4.2. Отброс почвы ротором с лопатками

Для определения закономерностей отбрасывания комков почвы ротором с лопатками (см. рис. 1.11), рассмотрим схему на рис. 5.12.

Рассмотрим силы и скорости, действующие на комок (точка M) в его абсолютном движении относительно подвижной системы координат XU , проведенной через точку M .

На рис. 5.12 приняты обозначения:

m – масса комка; R_i – текущий радиус нахождения комка на лопатке относительно центра вращения ротора O ; v_r – скорость относительного движения комка по поверхности лопатки; $v_o = \omega R_i$ – окружная скорость лопатки; v_a – абсолютная скорость движения комка; $\varphi = \omega t$ – текущий угол поворота лопатки; ω – угловая скорость вращения ротора; γ_x – угол установки плоскости лопатки к радиусу, проведенному в точке M ; α – угол наклона плоскости лопатки к окружной скорости в данной точке.

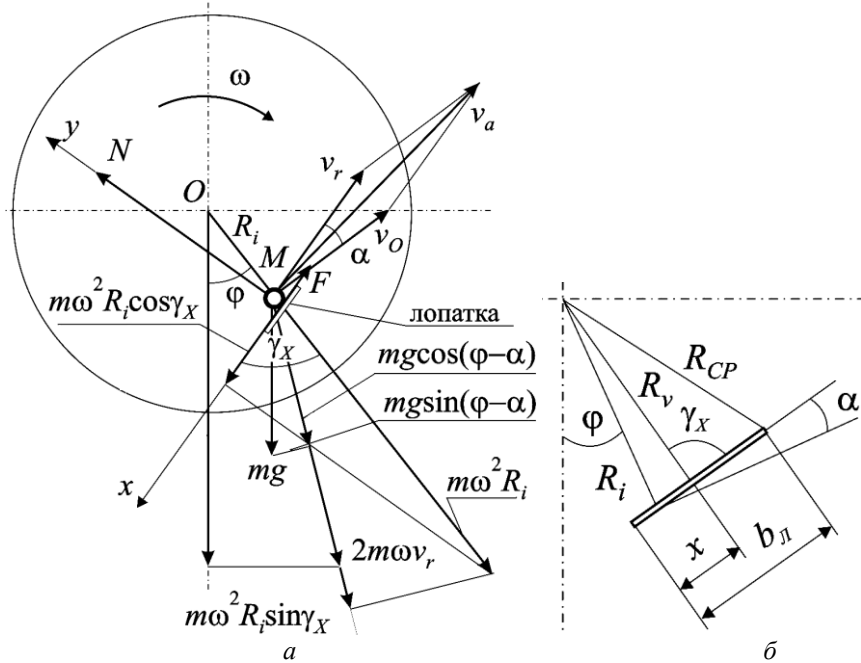


Рис. 5.12. Схема сил и скоростей комка почвы на лопатке ротора (а) и определение текущего радиуса комка (б)

На комок почвы действуют следующие силы:

1. Сила тяжести mg .
2. Центробежная сила $m\omega^2 R_i$.
3. Сила Кориолиса $2m\omega v_r$.
4. Сила трения $F=fN$.

При ускоренном скольжении комка по плоскости лопатки дифференциальное уравнение его движения имеет вид

$$m\ddot{x} = m\omega^2 R_i \cos \gamma_x - mg \sin(\varphi - \alpha) - mf [2\omega v_r + mg \cos(\varphi - \alpha) + \omega^2 R_i \sin \gamma_x]. \quad (5.61)$$

Из схемы на рис. 5.12, б следует

$$x = R_i \cos \gamma_X; \quad R_{CP} = R_i \sin \gamma_X.$$

После сокращения (5.61) на m и подстановки $\varphi = \omega t$ и $v_r = \dot{x}$ и преобразований, получим

$$\ddot{x} + 2f\omega\dot{x} - \omega^2 x = -g \sin(\omega t - \alpha) - fg \cos(\varphi - \alpha) - \omega^2 R_{CP} f. \quad (5.62)$$

Это уравнение представляет собой неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с правой частью. Общее решение его равно сумме общего решения соответствующего однородного уравнения и частного решения.

Характеристическое уравнение имеет вид

$$\lambda^2 + 2f\omega\lambda - \omega^2 = 0.$$

Общее решение $f(x)$ будем искать в форме

$$x_1 = c_1 e^{n_1 t} + c_2 e^{n_2 t},$$

где корни характеристического уравнения равны

$$r_1 = \omega(-f + \sqrt{1 + f^2}) = \omega n_1;$$

$$r_2 = \omega(-f - \sqrt{1 + f^2}) = \omega n_2.$$

Частное решение уравнения (5.62) найдем в виде

$$x_2 = A \sin(\omega t - \alpha) + B \cos(\omega t - \alpha) + C.$$

Тогда общее решение уравнения (5.62) можно представить

$$x = x_1 + x_2 = c_1 e^{n_1 \omega t} + c_2 e^{n_2 \omega t} + A \sin(\omega t - \alpha) + B \cos(\omega t - \alpha) + C. \quad (5.63)$$

Определение постоянных частного решения дает

$$\begin{aligned} A &= \frac{g}{2\omega^2} \cdot \frac{f^2 - 1}{f^2 + 1}; \\ B &= -\frac{fg}{\omega^2(f^2 + 1)}; \\ C &= -fR_{CP}. \end{aligned}$$

Относительная скорость движения комка по плоскости лопатки будет равна

$$\dot{x} = n_1 \omega c_1 e^{n_1 \omega t} + n_2 \omega c_2 e^{n_2 \omega t} + A \omega \cos(\omega t - \alpha) - B \omega \sin(\omega t - \alpha). \quad (5.64)$$

Примем, что в начале движения комка по плоскости лопатки при $t = 0$ $x = 0$ и $\dot{x} = 0$. Тогда постоянные интегрирования будут равны

$$\begin{aligned} c_1 &= -\frac{n_1}{n_2 - n_1} \left[(B \cos \alpha - A \sin \alpha + C) - \frac{1}{n_1} (A \cos \alpha + B \sin \alpha) \right] + \\ &+ A \sin \alpha - B \cos \alpha - C; \\ c_2 &= -\frac{n_1}{n_2 - n_1} \left[(B \cos \alpha - A \sin \alpha + C) - \frac{1}{n_1} (A \cos \alpha + B \sin \alpha) \right]. \end{aligned}$$

В уравнения (5.63) и (5.64) кроме текущего времени t входят переменные φ , ω , R_i , γ_x , характеризующие конструктивные и режимные параметры ротора. Эти уравнения являются трансцендентными функциями и не выражаются в элементарной форме, поэтому будем решать их графическим методом.

Примем следующие значения постоянных параметров: $R_{CP} = 0,15$ м; $\gamma = 60^\circ$; $\alpha = 5^\circ$; $f = 0,5$; $\omega = 10, 20$ и 30 с⁻¹; угол схода комков

$$\varphi_C < \frac{\pi}{2} + \alpha.$$

Задавая значения текущего времени t , по уравнениям (5.63) построим график пути перемещения комка по поверхности лопатки (рис. 5.13).

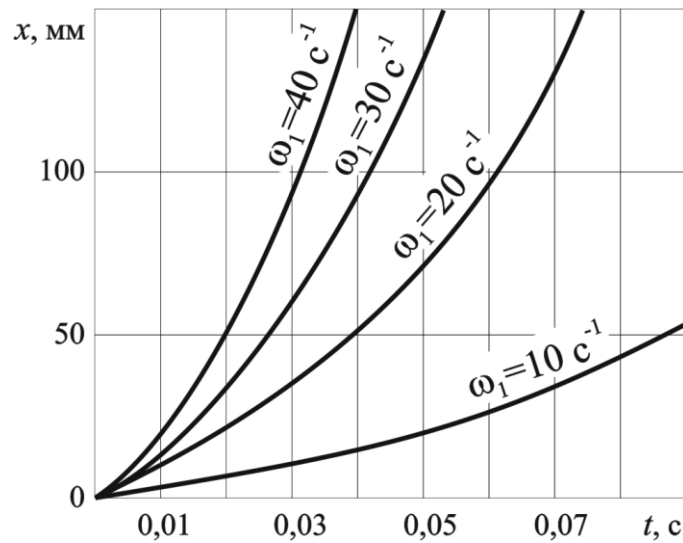


Рис. 5.13. Зависимость перемещения комка почвы по лопатке

Приравняв в уравнении (5.63) координату x ширине рабочей плоскости лопатки $x = b_L$, определим значение времени t прохождения комка по лопатке. Подставляя значение t в уравнение (5.64) для соответствующей ширины лопатки рассчитаем относительную скорость $\dot{x} = v_r$ движения комка (рис. 5.14).

Абсолютная скорость схода комков почвы с лопатки может быть определена по выражению

$$v_a = \sqrt{\dot{x}^2 + v_o^2}. \quad (5.65)$$

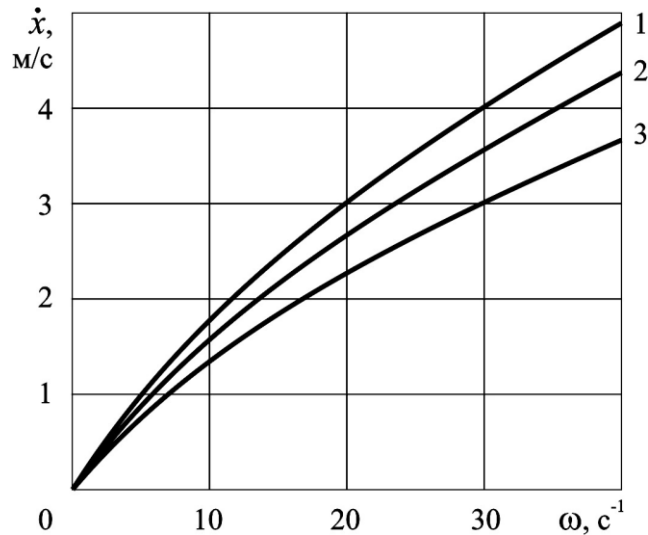


Рис. 5.14. Зависимость относительной скорости движения комка по лопатке от угловой скорости ротора и ширины лопатки:
1 – 100 мм; 2 – 75 мм; 3 – 50 мм

5.5. Ширина и дальность рассеивания почвы

Сходящие с зубьев или лопаток комки почвы отбрасываются в борозду и на пласты предыдущего прохода плуга. Ширина полосы рассеивания и дальность отбрасывания комков во многом определяют качество вспашки комбинированным плугом.

Определим дальность полета комков почвы с учетом действующих сил (рис. 5.15). В момент схода с зуба или лопатки ротора на комок действует силы тяжести G и сопротивления воздуха R_{CP} .

Рассматривая в первом приближении движение комков в одной плоскости, составим уравнение движения. Направим координатные оси X и Y через точку схода комка так, чтобы ось OX совпадала с первоначальным направлением движения комка.

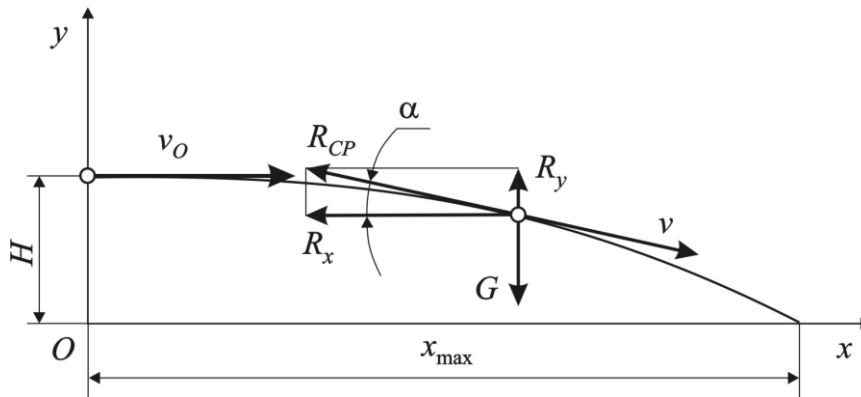


Рис. 5.15. Схема сил, действующих на комок почвы, отброшенный ротором

Тогда уравнение в проекциях на координатные оси будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= -R_{CP} \cos \alpha_C = -k_{II} m v_x^2 \cos \alpha_C; \\ m\ddot{y} &= -mg + R_{CP} \sin \alpha_C = -mg + m k_{II} m v_y^2 \sin \alpha_C, \end{aligned} \right\} \quad (5.66)$$

где α_C – угол наклона вектора скорости v_a к оси OX ,
 k_{II} – коэффициент сопротивления среды или парусности.

Для решения этих дифференциальных уравнений примем угол $\alpha_C = 0$, т.к. он не превышает 10° , ввиду отбрасывания комков с малой высоты (не более 0,5 м) на откос предыдущего пласта (рис. 5.16).

Тогда уравнения (5.66) можно упростить:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= -k_{II} v_x^2; \\ \ddot{y} &= -g. \end{aligned} \right\} \quad (5.67)$$

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{1}{k_{II} t - C_1}; \\ v_y &= -gt + C_2. \end{aligned} \right\} \quad (5.68)$$

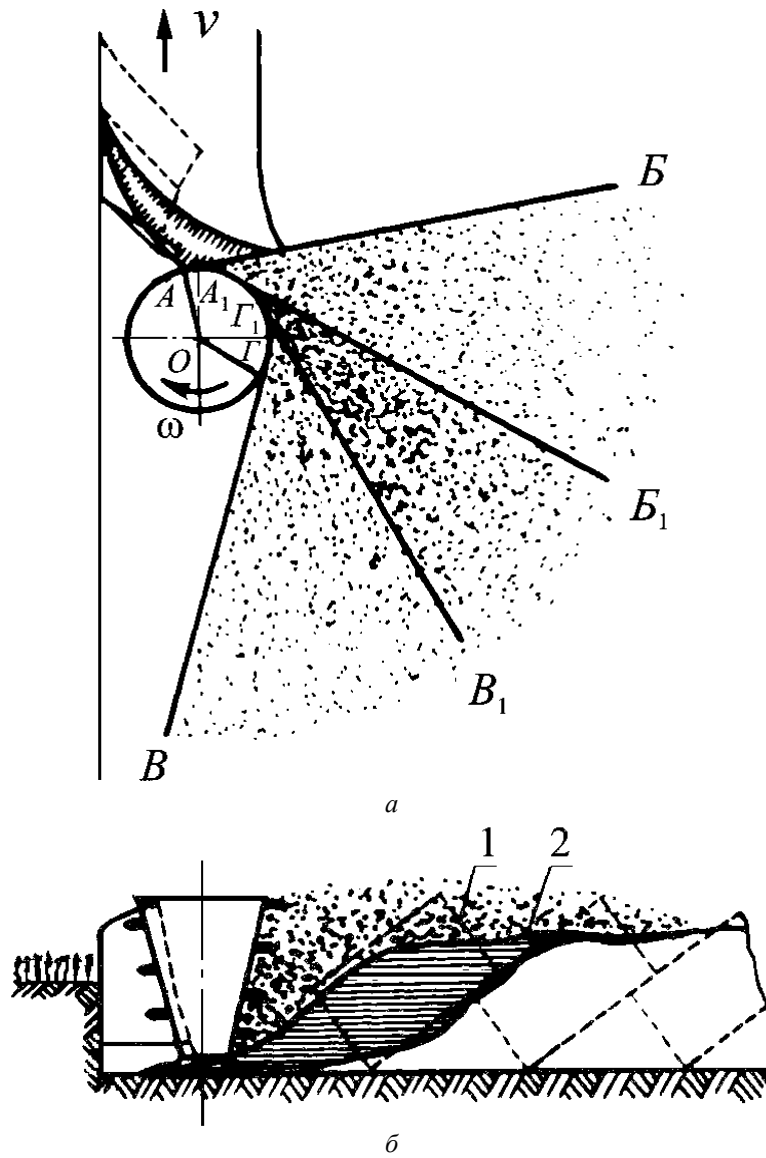


Рис. 5.16. Схема отбрасывания почвы комбинированным корпусом плуга:
 а – вид сверху; б – вид сзади

В результате разделения переменных и интегрирования получим:

Постоянные интегрирования найдем из начальных условий при $t = 0$; $v_x = v_{x0}$; $v_y = v_{y0}$; $C_1 = -\frac{1}{v_{x0}}$; $C_2 = v_{y0}$, где v_{x0} и v_{y0} – проекции начальной скорости схода комков с элементов ротора.

Уравнения (5.68) после подстановки постоянных интегрирования и преобразований примут вид

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{1}{k_{\Pi}t - v_{x0}^2}; \\ v_y &= -gt + v_{y0}. \end{aligned} \right\} \quad (5.69)$$

После интегрирования уравнений (5.69) и определения постоянных при $t = 0$; $x = 0$; $y = H$, получим

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{1}{k_{\Pi}} \ln(k_{\Pi}v_{x0}t + 1); \\ y &= H - \frac{gt^2}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (5.70)$$

Для определения уравнения траектории комка исключим из уравнений (5.70) текущее время, тогда

$$k_{\Pi}v_{x0} \sqrt{\frac{2H - y}{g} + 1} = e^{k_{\Pi}x}$$

или

$$y = 2H - g \left(\frac{e}{k_{\Pi}^2 v_{x0}^2} + 1 \right). \quad (5.71)$$

Дальность отбрасывания комков x_{\max} определяется из выражения (5.70) при подстановке значения $y = 0$:

$$x_{\max} = \frac{1}{k_{II}} \ln \left(k_{II} v_{x0} \sqrt{\frac{2H}{g} + 1} \right). \quad (5.72)$$

Из этого уравнения следует, что дальность отбрасывания комков почвы зависит от начальной скорости их схода с элементов ротора, коэффициента парусности и высоты расположения зубьев или лопаток над дном борозды.

Вместе с комками почвы ротор отбрасывает также частицы минеральных и органических удобрений, стерни и других растительных остатков, находящихся на поверхности поля. Растительные остатки имеют больший, чем почвенные комки коэффициент парусности. Поэтому дальность полета растительных остатков меньше, чем комков почвы. Принимая коэффициент парусности для солоmistых остатков $k_{II} = 0,272 \dots 0,805$, а для почвенных комков $k_{II} = 0,034 \dots 0,280$, аналогично частицам минеральных удобрений [38], начальную скорость отбрасывания $v_{x0} = 8,0$ м/с равную окружной скорости верхних зубьев ротора и $H = 0,5$ м, находим, что дальность отбрасывания солоmistых остатков $x_{\max C} = 0,4 \dots 1,2$ м, а почвенных комков $x_{\max K} = 1,4 \dots 2,5$ м. Благодаря различной величине коэффициента парусности и различной высоте, с которой происходит отброс частиц, следует ожидать хорошего перемешивания слоев почвы и заделки солоmistых остатков, что и было подтверждено в результате лабораторных и полевых опытов (см. Главу 8).

Полученные в почвенном канале кинограммы работы комбинированного корпуса позволили экспериментально определить рассеивание комков почвы ротором. Из схемы процесса на рис. 5.16 *a* видно, что ротор отбрасывает частицы почвы в форме факела, ограниченного площадью $ABV\Gamma$, причем основная масса почвы (75...80%) укладывается в зоне $A_1B_1V_1\Gamma_1$. Незначительная часть почвы отбрасывается

назад, что приводит к засыпанию дна борозды слоем почвы толщиной 1...2 см. Отбрасывание почвы на пласт предыдущего прохода приводит к выравниванию поверхности обработанного поля. На рис. 5.17 показан вид фрагмента поля, обработанного комбинированным плугом ПВН-3-35.

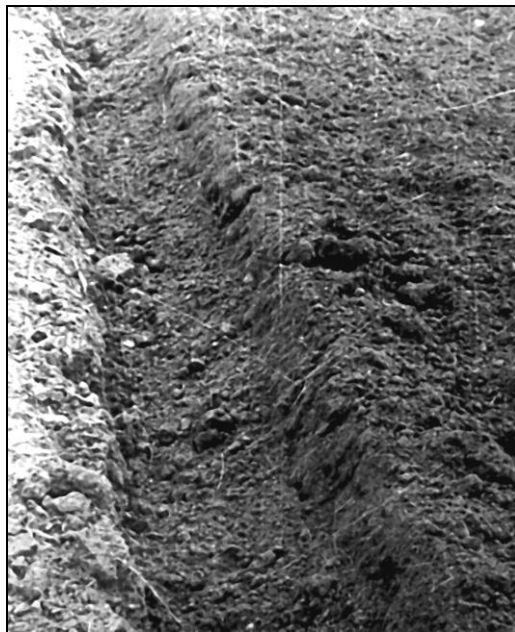


Рис. 5.17. Вид поля, обработанного комбинированным плугом ПВН-3-35

На фотографии видно, что благодаря отброшенной ротором почве, поверхность поля хорошо выровнена и часть ее засыпала дно борозды предыдущего прохода. Отброшенные ротором комки оказывают динамическое давление на рыхлую почву предыдущего прохода, равное примерно 0,15...0,3 МПа, что эквивалентно давлению легких гладких катков. Поэтому *следует ожидать, что вспушенность поверхности поля при обработке комбинированными плугами будет меньше, чем после серийных лемешно-отвальных плугов.*

Глава 6. Динамика ротора комбинированного плужного корпуса

Работа плугов с комбинированными корпусами, как и любых других почвообрабатывающих машин, характеризуется значительной неравномерностью сил сопротивления, создающих переменную нагрузку на двигатель трактора и привод. Кратковременные нагрузки в системе «плуг – привод - двигатель - трактор» преодолеваются инерцией движущихся и вращающихся масс МТА и не оказывают существенного влияния на технологический процесс.

Для преодоления значительных перегрузок, возникающих при трогании с места, при разгоне и резких скачках сопротивления, система «плуг – ротор – привод - ВОМ – двигатель» должна обладать достаточным запасом кинетической энергии для сохранения заданных технологических режимов работы МТА. Поэтому для оптимальной работы двигателя трактора и устойчивости рабочих органов так важен правильный выбор моментов инерции движущихся масс агрегата и, прежде всего, роторов плуга.

В системе привода роторов от ВОМ трактора имеется клиноременная передача, которая выполняет функцию предохранителя от перегрузок. Это позволяет рассматривать динамику ротора как автономной системы, не зависимой от других роторов, трансмиссии трактора и привода ВОМ.

Взаимосвязь параметров системы «машина – трактор» изложена акад. В.П. Горячкиным в работе «Теория масс и скоростей сельскохозяйственных машин и орудий» [18]. Согласно этой теории, основная задача земледельческой механики заключается в том, чтобы подобрать целесообразное соотношение между массами и скоростями

рабочего органа и параметрами рабочей среды. Он считал, что «...должны существовать некоторые предельные размеры по массе и скоростям. Излишек массы бесполезен и даже вреден, а с другой стороны недостаток ее также недопустим».

В данном случае выбор оптимальных механических и режимных параметров ротора является основой для бесперебойного крошения всего пласта почвы в сочетании с располагаемой мощностью, поступающей на ротор от ВОМ трактора. Задача усложнена тем, что технологический процесс крошения происходит при непрерывно меняющейся массе почвы и, строго говоря, относится к механике переменной массы. Кроме того, крошение пласта рабочими элементами ротора является ударным процессом. Все это необходимо учитывать при выборе параметров ротора.

Как было установлено выше, при ударе элементов ротора о пласт почвы его кинетическая энергия расходуется на деформацию комков. Мощность на деформацию комков почвы определяется потерянной живой силой согласно уравнению (5.25). Так как в работе одновременно участвуют z элементов (зубьев или лопаток) ротора, то за время одного

оборота $t = \frac{2\pi}{\omega}$ мощность, необходимая на деформацию, будет равна

$$N_{\text{деф}} = \frac{1}{2} \frac{J(1 - k_B^2)mv_y^2}{J + mR_i^2} z \frac{2\pi}{\omega}. \quad (6.1)$$

Выразим последнее уравнение через момент количества движения

$$J(\omega_1 - \omega_2) = mR_i^2 \omega_2, \quad (6.2)$$

где m – масса почвы, поступающая на ротор;

ω_1 и ω_2 – угловые скорости ротора до и после удара.

Из этого уравнения следует, что ротор с моментом инерции J расходует в единицу времени момент количества движения $J(\omega_1 - \omega_2)$ на то, чтобы сообщить массе почвы m угловую скорость ω_2 [90].

Из уравнения (6.2) можно определить величину массы условного комка, при ударе о который начальная скорость вращения ротора снизится с ω_1 до ω_2 :

$$m = \frac{J}{R_i^2} \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} - 1 \right). \quad (6.3)$$

Из этого уравнения видно, что чем больше разность угловых скоростей ротора ω_1 и ω_2 и чем больше приведенная к точке удара масса ротора $\frac{J}{R_i^2}$, тем бóльшая масса комка m будет раскрошена.

Разность угловых скоростей ω_1 и ω_2 учитывается коэффициентом неравномерности

$$\Delta = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_{CP}}, \quad (6.4)$$

где $\omega_{CP} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ - среднее значение угловой скорости.

Из последнего уравнения найдем

$$\omega_1 = \omega_{CP} \left(1 + \frac{\Delta}{2} \right); \quad \omega_2 = \omega_{CP} \left(1 - \frac{\Delta}{2} \right),$$

тогда $\omega_1^2 - \omega_2^2 = 2\Delta\omega_{CP}^2$.

С учетом полученных зависимостей основное уравнение динамики ротора согласно [19] можно записать

$$N = J\omega \frac{d\omega}{dt} \quad (6.5)$$

или

$$N = J \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\Delta t} = J \frac{\omega_{CP}^2 \Delta}{\Delta t}, \quad (6.6)$$

где Δt – время удара.

Полагаем, что время удара равно времени перегрузки. В нашем случае время перегрузки будет равно времени между двумя последовательными ударами зубьев или лопаток о пласт, т.е.

$$\Delta t = \frac{60\varphi_K}{zn_P}, \quad (6.7)$$

где z – число зубьев ротора в одной плоскости;
 n_P – частота вращения ротора, мин^{-1} .

Подставим в уравнение (6.6) значение ω_{CP} , время удара Δt , а также выразив частоту вращения n_P через угловую скорость, получим

$$N = J \frac{\omega_{CP}^3 z}{2\pi\varphi_K} \Delta. \quad (6.8)$$

Отсюда следует, что при известной мощности N можно определить необходимый момент инерции ротора

$$J = \frac{2\pi N \varphi_K}{\omega_{CP}^3 z \Delta}. \quad (6.9)$$

И.С. Полтавцев [67] рекомендует брать коэффициент неравномерности Δ в пределах 0,025...0,05, а А. Далин и П.В. Павлов допускают снижение угловой скорости при перегрузках до 0,8 от ее среднего значения.

Принимая, что почвенный комок имеет шарообразную форму, определим массу условного комка

$$m = \rho D_y^3.$$

Подставляя эту формулу в уравнение (6.3), найдем предельный размер комка, который может быть разрушен при заданном моменте инерции ротора и его скоростном режиме

$$D_y = \sqrt[3]{\frac{Jg}{\rho R_i^2} \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} - 1 \right)}. \quad (6.10)$$

Из уравнения (6.10) следует, что ротор может работать с заданной неравномерностью, если размер D_y условного комка будет меньше или равен средневзвешенному диаметру D_{CP} комка, поступающего на ротор после предварительного крошения на лемешно-отвальной части комбинированного корпуса, т.е. $D_y \leq D_{CP}$.

При проектировании комбинированных плугов, когда мощность необходимая для работы ротора неизвестна, З. Юсупов рекомендует следующий порядок определения потребной мощности ротора [90].

Допуская, что комки почвы поступают на ротор равномерным потоком, обозначим работу, необходимую для крошения одного комка с начальным размером D_{CP} до размера d_{CP} через A , тогда затраты мощности ротора равны

$$N = \frac{1}{2} J (\omega_1^2 - \omega_2^2). \quad (6.11)$$

Для восстановления потерянной угловой скорости ротора с ω_2 до ω_1 необходимо выполнить работу

$$A = M_{кр} \Delta\varphi, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (6.12)$$

где $\Delta\varphi$ - угол поворота ротора за время изменения угловой скорости с ω_2 до ω_1 .

Так как вращение ротора за этот промежуток времени будет ускоренным, то можно принять $\Delta\varphi = \omega_2 \Delta t + \frac{d\omega}{dt} (\Delta t)^2$. Тогда уравнение (6.11) примет вид

$$N = J \frac{d\omega}{dt} \left(\omega_2 \Delta t + \frac{\frac{d\omega}{dt} (\Delta t)^2}{2} \right).$$

Отсюда

$$\left(\frac{d\omega}{dt} \right)^2 + \frac{2\omega_2}{\Delta t} \frac{d\omega}{dt} - \frac{2E}{J(\Delta t)^2} = 0, \quad (6.13)$$

где Δt – время, необходимое для восстановления потерянной ротором скорости.

Время Δt можно определить по уравнению (6.7) или из отношения

$$\Delta t = \frac{G_k}{Q}, \quad (6.14)$$

где $G_k = mg$ – вес одного комка, поступившего на ротор, кг;

$Q = abv\rho$ – поступление почвы на ротор или производительность плужного корпуса, кг/с;

a , b и v – глубина, ширина захвата и поступательная скорость корпуса плуга.

Подставляя значение ω_2 , определяемое из (6.11) и Δt из (6.14) и решив уравнение (6.13) относительно $\frac{d\omega}{dt}$, получим

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2E}{J\omega_2^2}} \right)}{G_K} Q. \quad (6.15)$$

Из этого уравнения следует, что угловое ускорение ротора, идущее на крошение почвы, прямо пропорционально производительности комбинированного корпуса, и обратно пропорционально весу или размеру поступающих на ротор комков почвы.

Зная ускорение ротора, можно воспользоваться уравнением динамики вращающихся масс (6.5) и определить мощность, необходимую для привода ротора

$$N = \frac{J\omega^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2A}{J\omega^2}} \right)}{G_K} Q. \quad (6.16)$$

Для более детального анализа факторов, влияющих на затраты мощности, воспользуемся некоторыми положениями теории дробления материалов [5, 9].

Работа A , необходимая для разрушения твердого тела, в зависимости (6.16) согласно обобщенному уравнению П.А. Ребиндера выражается зависимостью (4.7).

С учетом исходной поверхности комков, имеющих в естественно сложенной почве до ее поступления пласта на лемех и отвал комбинированного корпуса, приращение поверхности вновь образованных после крошения ротором комков составит

$$\Delta S = \Delta S_{KP} - S_O, \quad (6.17)$$

где S_{KP} – площадь поверхности вновь образованных комков;

S_O – площадь поверхности комков в почве до обработки.

Полагаем, что объем и масса комков почвы до и после прохода плуга остаются постоянными. Объем обработанной почвы определяется по формуле

$$V = abs\rho, \quad (6.18)$$

где a и b – глубина и ширина пласта;
 s – подача на рабочий элемент ротора.

Тогда прирост вновь образованных поверхностей составит

$$\Delta S = abs \cdot 8 \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{d_{CP}} - \frac{P_i}{D_{CP}} \right). \quad (6.19)$$

Подставив значение ΔS в уравнение (4.7), найдем работу на крошение почвы, поступившей на ротор

$$A = k_s 8abs\rho \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{d_{CP}} - \frac{P_i}{D_{CP}} \right) + \frac{\sigma_{ПП}^2 V}{2E}. \quad (6.20)$$

После вычисления величины работы, необходимой для крошения почвы по уравнению (6.20), можно определить мощность для привода ротора по зависимости (6.16).

Размер комков почвы, используемый в изложенных выше зависимостях может быть определен по известным методикам. А именно: при крошении почвы каким-либо рабочим органом определяют фракционный или размерный состав раскрошенной почвы с помощью решет и сит (так называемый ситовой анализ). За средний размер комка каждой фракции принимают среднее значение отверстий верхнего и нижнего смежных решет (сит), т.е. среднее значение диаметров наибольших и наименьших комков во фракции [64]:

$$d_{CP} = \frac{d_{iB} + d_{iH}}{2}, \quad (6.21)$$

где d_{iB} и d_{iH} – размеры отверстий верхних и нижних смежных решет или сит.

Рассматривая общий вес почвенной пробы как статистическую совокупность всех фракций, отношение веса комков одной фракции к общему весу пробы определяет частоту или долевой выход соответствующей фракции [64]:

$$p_i = \frac{Q_i}{Q_{\Pi}}, \quad (6.22)$$

где Q_i – вес комков в i -й фракции;

Q_{Π} – общий вес почвенной пробы.

Глава 7. Энергозатраты на обработку почвы плугами с комбинированными корпусами

7.1. Силы, действующие на ротор

Схема сил, действующих на ротор комбинированного корпуса, показана на рис. 7.1.

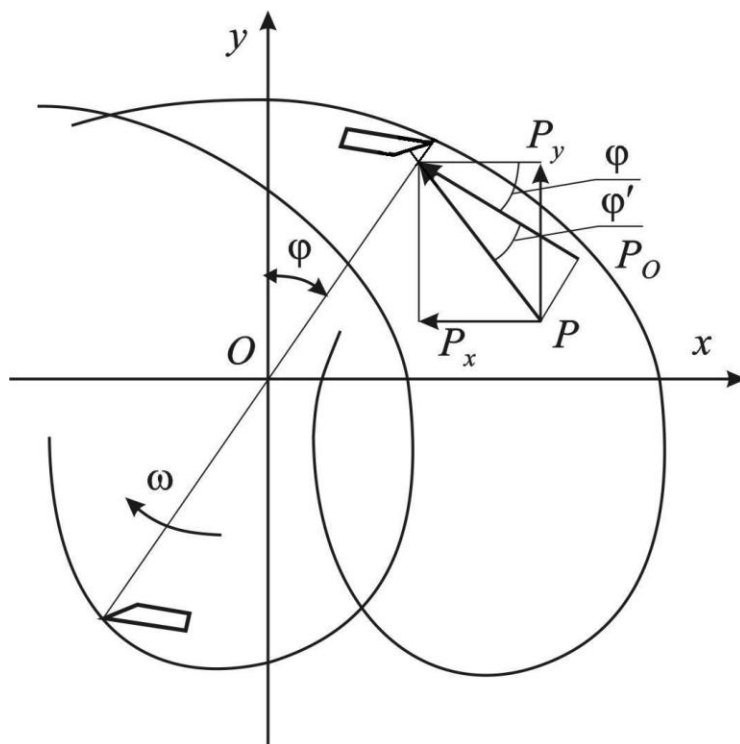


Рис. 7.1. Схема сил, действующих на ротор комбинированного корпуса

Общее сопротивление P ротора при взаимодействии с пластом почвы может быть представлено суммой трех составляющих согласно уравнению (2.14). Разложив силу P на составляющие P_x и P_y , видим, что

боковая составляющая $P_y = P \sin(\varphi + \psi')$ стремится сместить ротор в сторону стенки борозды, нарушая устойчивость хода плуга в горизонтальной плоскости. Составляющая $P_x = P \cos(\varphi + \psi')$ создает тяговое сопротивление.

7.2. Мощность необходимая для работы плуга с комбинированными корпусами

Для комбинированного плуга с тяговыми и приводными рабочими органами баланс мощности выражается следующими составляющими:

$$N = N_{ПЕР} + N_P^T + N_{ОТБ}^T + N_P^{ПП} + N_{ОТБ}^{ПП} + N_{ТР}, \quad (7.1)$$

где $N_{ПЕР}$ – мощность на перемещение плуга;
 N_P^T и $N_P^{ПП}$ – мощности на резание и крошение почвы соответственно тяговыми и приводными рабочими органами;
 $N_{ОТБ}^T$ и $N_{ОТБ}^{ПП}$ – мощности на отбрасывание почвы соответственно тяговыми и приводными рабочими органами;
 $N_{ТР}$ – потери мощности в передачах плуга.

Определим перечисленные составляющие баланса мощности для трех видов передачи энергии от двигателя трактора: через прицепной крюк, через ВОМ и комбинированный (одновременно через прицепной крюк и ВОМ).

Для всех трех случаев мощность, расходуемая на перемещение машины, равна

$$N_{ПЕР} = \mu_K Q_Z v, \quad (7.2)$$

где μ_K – коэффициент сопротивления перекачиванию опорных колес;
 Q_Z – вертикальная нагрузка на опорные колеса.

Для определения нагрузки Q_Z достаточно использовать уравнение равновесия плуга с учетом всех действующих сил. Нагрузка Q_Z приближенно равна

$$Q_Z = G_M \pm \sum P_Z, \quad (7.3)$$

где G_M – сила тяжести плуга;
 $\sum P_Z$ – сумма всех вертикальных составляющих сил сопротивления, действующих на комбинированные рабочие органы.

Мощность на подрезание и крошение пласта, а также на оборот и отбрасывание пласта почвы тяговыми (лемешно-отвальными) рабочими органами можно выразить известными уравнениями в соответствии со вторым и третьим членами рациональной формулы В.П. Горячкина:

$$N_P^T = kabv \quad (7.4)$$

и

$$N_{ОТБ}^T = \varepsilon abv^2. \quad (7.5)$$

Для определения мощности на резание и крошение почвы приводными рабочими органами воспользуемся следующими соображениями. Отрезание стружки ножом (лопаткой или зубом) ротационного рабочего органа (ротора) можно рассматривать как отделение пласта переменной толщины. Тогда по аналогии с тяговыми рабочими органами сопротивление отрезанию стружки определяется по формуле

$$P_P = k_P \delta b = k_P b S \cos \varphi. \quad (7.6)$$

Работа резания будет равна

$$A_{Pi} = \int_0^l P_P dl,$$

где dl – элемент дуги траектории ножа, который можно представить

$$dl = \frac{R}{v_0} \sqrt{v^2 + v_0^2 - 2vv_0 \sin \varphi} d\varphi. \quad (7.7)$$

Тогда работа резания составит

$$A_{Pi} = k_p b S \frac{R}{v_0} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{v^2 + v_0^2 - 2vv_0 \sin \varphi} \cos \varphi d\varphi, \quad (7.8)$$

где φ_1 и φ_2 – углы начала и конца резания стружки.

Для ориентировочных расчетов можно принять $\sin \varphi \approx 1$ и

$\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$, тогда

$$A_{Pi} = k_p b S R \frac{v - v_0}{v_0} (1 - \sin \varphi).$$

Заменяв выражение $R(1 - \sin \varphi)$ на a – глубину резания, окончательно получим

$$A_{Pi} = k_p a b S \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) = k_p a b S \left(1 - \frac{v}{v_0}\right). \quad (7.9)$$

Мощность на резание стружки за один оборот ротора составит

$$N_{Pi}^{ПП} = A_{Pi} \frac{n_p z}{60} = k_p a b S \frac{n_p z}{60} \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right).$$

Выражая поступательную скорость машины через подачу и частоту вращения барабана $v = S n_p z / 60$, получим

$$N_{Pi}^{ПП} = k_p a b v \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right).$$

Мощность для всего плуга составит

$$N_P^{ПП} = k_p a B v \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right). \quad (7.10)$$

Мощность, необходимая для работы ротора, расходуется на преодоление вредных сопротивлений, сил трения рабочего органа о пласт почвы, деформацию почвы, транспортирование и отбрасывание почвы. Вредные сопротивления обусловлены в основном трением в подшипниках и сопротивлением воздуха. По аналогии с молотильным барабаном вредные сопротивления можно выразить уравнением $N_B = A\omega + B\omega^2$, т.е. они являются функцией угловой скорости вращения ротора. Ввиду того, что частота вращения ротора невелика (200...300 мин⁻¹), этот вид сопротивления можно не учитывать.

Мощность на преодоление сил трения на роторе зависит от силы трения, возникающей между рабочими элементами ротора и почвой, а также трения почвы о почву. Сила трения элементов ротора о почву возникает на их передних гранях и зависит от силы напора пласта и коэффициента внешнего трения f , т.е. ориентировочно $F_H = fP_H$.

Сила напора пласта прямо пропорциональна тяговому сопротивлению корпуса плуга, тогда

$$F_H = C_1kabf,$$

где C_1 – коэффициент пропорциональности.

Сила трения почвы о почву зависит от центробежных сил инерции, действующих на комки почвы и коэффициента трения почвы по почве f' , и, следовательно, равна

$$F_{ин} = m\omega^2 R_i f'.$$

Работа, необходимая для преодоления всех сил трения на роторе, равна

$$A_{TP} = C_1kabfR_i\varphi_K + m\omega^2 R_i^2 f'\varphi_K, \quad (7.11)$$

где φ_K – угол контакта ротора с почвой.

Мощность на преодоление сил трения выразится

$$N_{TP} = A_{TP} \frac{n_P z}{60}, \quad (7.12)$$

где n_P – частота вращения ротора, мин^{-1} .

Затраты мощности на деформацию почвы определяются потерянной при ударе кинетической энергией ротора, которая может быть рассчитана по уравнению (5.22).

Если одновременно в работе участвуют z рабочих элементов ротора (лопаток или зубьев), то за время $t = \frac{2\pi}{\omega}$ мощность, необходимая на деформацию, составит

$$N_{ДЕФ}^{ПР} = \frac{1}{2} \frac{J(1 - k_B^2) m v_{уд}^2}{J + m R_i^2} z \frac{\omega}{2\pi}$$

или выражая ω через частоту вращения ротора, получим

$$N_{ДЕФ}^{ПР} = \frac{1}{2} \frac{J(1 - k_B^2) m v_{уд}^2}{J + m R_i^2} z n_P, \quad (7.13)$$

где m – масса почвы, поступающая на ротор.

Мощность, расходуемая на отбрасывание почвы ротором можно определить, используя уравнение ударного импульса при вращательном движении [42]:

$$\int_0^t M \Delta t = J(\omega_1 - \omega_2) = m R_i^2 m' \frac{\omega_{CP}^2}{2}. \quad (7.14)$$

или средний момент удара

$$M_{CP} = J \frac{d\omega}{dt} = R_i \frac{v_0}{2} = R_i^2 m' \frac{\omega_{CP}^2}{2}.$$

Мощность на отбрасывание почвы массой m' равна

$$N_{OTB} = M_{CP} \omega_{CP} = \frac{m' v_0^2}{2}. \quad (7.15)$$

Массу почвы m' , поступающую на ротор за единицу времени, найдем из следующих соотношений. Средний объем почвы, приходящийся на один элемент ротора, равен

$$V_{CP} = \frac{abv}{n_p z} \rho, \quad (7.16)$$

где a и b – глубина и ширина захвата одного корпуса плуга;

n_p – частота вращения ротора;

z – число элементов ротора, одновременно находящихся в работе.

Тогда масса почвы, приходящаяся на один элемент ротора, будет равна

$$m' = V \rho = \frac{abv}{n_p z} \rho = \frac{abS}{60} \rho, \quad (7.17)$$

Подставляя значение m' в уравнение (7.15), окончательно получим

$$N_{OTB} = \frac{abS\rho}{2 \cdot 60} v_0^2 = ab\rho v_0^2 \approx ab\rho \lambda v^3. \quad (7.18)$$

Общие затраты мощности на работу плуга с комбинированными корпусами равны

$$\begin{aligned}
 N = & (fG_M + kab + \varepsilon abv^2)v + \\
 & + (C_1kabfR_i\varphi_K + abS\rho\omega^2R_i^2f'\varphi_K)\frac{n_Pz}{60} + \\
 & + \frac{Jmv_{y0}^2zn_P(1-k_B)}{1,2 \cdot 10^3(J + mR_i^2)} + ab\rho\lambda^2v^3.
 \end{aligned} \tag{7.19}$$

Необходимо отметить, что изложенные теоретические предпосылки нуждаются в экспериментальной проверке, некоторые результаты которой приведены в главе 8.

Глава 8. Результаты экспериментальных исследований плугов с комбинированными корпусами

8.1. Лабораторные испытания

Технологический процесс работы комбинированного плужного корпуса изучался в почвенном канале ВИСХОМ на специальной установке (рис. 8.1).

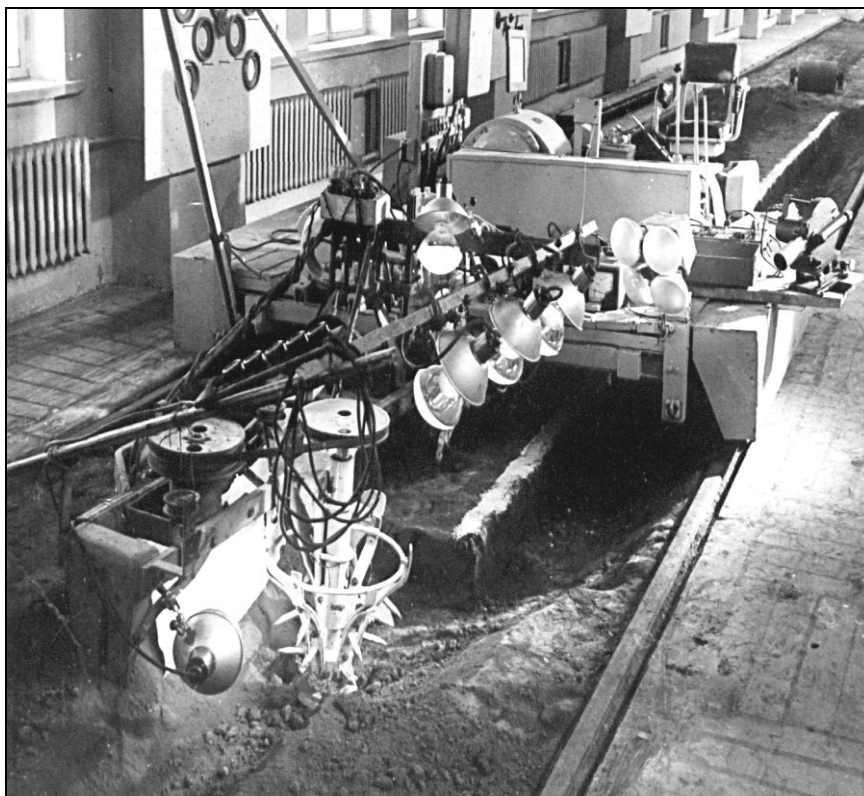


Рис. 8.1. Испытания ротора комбинированного корпуса в почвенном канале

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

На навесное устройство тележки почвенного канала навешивались роторы различных типов с приводом. Борозда готовилась предварительным проходом серийного лемешно-отвального корпуса. Почва в канале представляла собой бесструктурный суглинок твердостью 0,95...1,15 МПа и влажностью 15...18%.

Для определения скорости отбрасывания почвы и других параметров работы ротора проводилась скоростная киносъемка с частотой 1300 кадров в секунду. Обработка кинограмм показала, что **уже на лемехе и укороченном отвале происходит разделение пласта на крупные глыбы и комки** и на ротор поступает не монолитный пласт, а в значительной степени раскрошенный.

При работе комбинированного корпуса классическая схема оборота пласта нарушается: пласт под воздействием ротора теряет свою форму и разбрасывается на значительную площадь поля (см. рис. 5.15 и 5.16).

С увеличением поступательной скорости $v_{П}$ плуга скорость отбрасывания частиц почвы ротором v_a снижается (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Скорость отбрасывания почвенных частиц ротором v_a , м/с

| Высота расположения зуба над дном борозды, мм | Поступательная скорость плуга $v_{П}$, м/с | | | |
|---|---|------|----------|------|
| | 1,0 | 2,0 | 1,0 | 2,0 |
| | Скорость отбрасывания частиц, v_a , м/с | | | |
| | Ротор №1 | | Ротор №2 | |
| 40 | 4,90 | 4,30 | 5,20 | 4,75 |
| | 4,65 | 4,26 | 4,66 | 4,36 |
| | 4,60 | 4,17 | 4,40 | 3,86 |
| 35 | 4,15 | 3,25 | 4,32 | 4,76 |
| | 3,86 | 3,05 | 4,08 | 3,32 |
| 30 | 2,85 | 2,35 | 3,90 | 2,56 |
| | 2,80 | - | 3,62 | 3,32 |

На основании данных табл. 8.1 получили следующее эмпирическое уравнение для определения скорости отбрасывания почвы ротором:

$$v_a = v_o - k_o v_{II}, \quad (8.1)$$

где k_o – коэффициент пропорциональности (в диапазоне поступательных скоростей $v_{II} = 1 \dots 2$ м/с величина $k_o = 0,8 \dots 0,9$).

8.2. Полевые испытания

После уточнения картины технологического процесса комбинированных плужных корпусов дальнейшие их испытания проводились в полевых условиях в Липецкой области на стерне ячменя и озимой пшеницы. Почва опытных участков – выщелоченный чернозем среднесуглинистого механического состава. Твердость почвы изменялась в пределах 2,1...2,25 МПа, влажность – в пределах 13,2...26,3%.

Для определения силовых и энергетических характеристик плугов с комбинированными корпусами, а также для проведения сравнительных испытаний была использована полевая динамометрическая установка (рис. 8.2 а). Установка выполнена в виде четырехкорпусного прицепного плуга, в котором первый комбинированный корпус 9 и 10 и третий серийный 6 не динамометрировались. Их назначение – подготавливать борозду для последующих динамометрических корпусов 5 и 8. Конструкция установки позволяет изменять взаимное расположение ротора 7 и укороченного корпуса 8 в продольном и в поперечном направлениях.

Для измерения горизонтальной составляющей сил сопротивления на рабочих органах (корпусах и роторе) был использован четырехзвенный механизм (рис. 8.2 б) со встроенным электрическим тяговым звеном. Для

замера крутящего момента на роторе использовался тензометрический вал (рис. 8.2 *в*) с датчиками, соединенными по мостовой схеме (рис. 8.2 *г*).

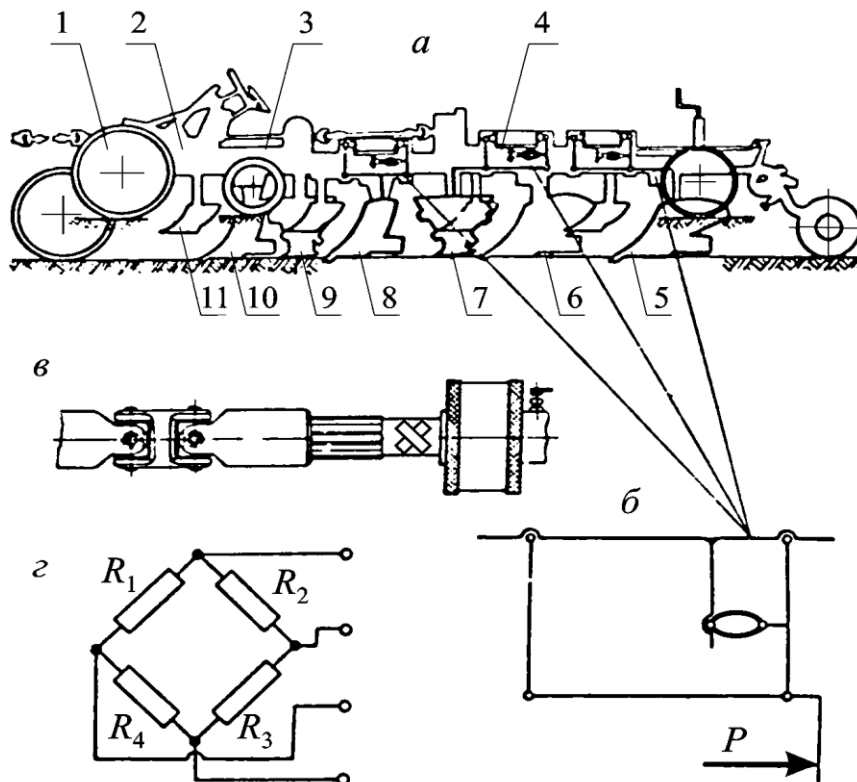


Рис. 8.2. Схема полевой динамометрической установки для исследования комбинированных плужных корпусов:

- а* – общая схема установки, где
- 1 – колесо (всего четыре);
- 2 – рама; 3 – механизм привода роторов; 4 – четырехзвенная подвеска (всего три); 5 и 6 – корпуса; 7 и 9 – роторы; 8 и 10 – укороченные корпуса; 11 – предплужник;
- б* – четырехзвенный механизм подвески корпусов и ротора;
- в* – тензометрический вал привода ротора;
- г* – мостовая схема наклейки датчиков

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

Объектами исследования на установке были роторы восьми вариантов (рис. 8.3) в комбинации с укороченным лемешно-отвальным корпусом культурного типа.

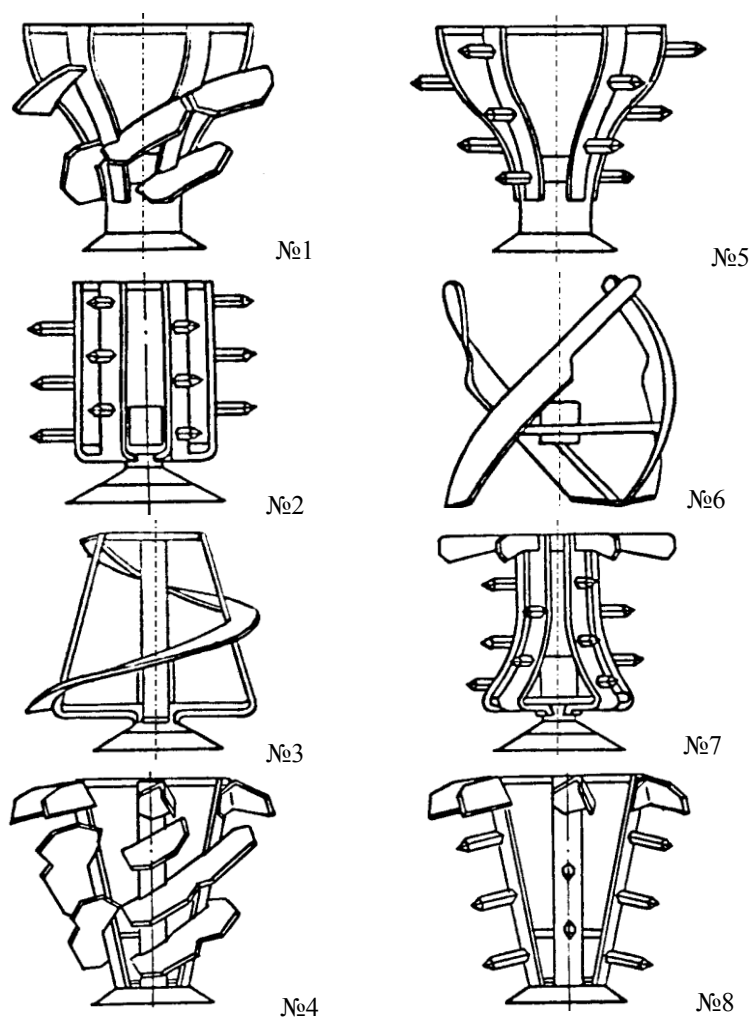


Рис. 8.3. Типы роторов исследованных на полевой установке

Программой испытаний предусматривалось динамометрирование плужных корпусов с указанными типами роторов при их различном расположении относительно корпуса, изучение влияния на крутящий момент M_p ротора частоты его вращения n_p , поступательной скорости $v_{пл}$, а также установки предплужника и варьирования ширины захвата лемеха [85].

В первом приближении тяговое сопротивление укороченного корпуса определялось по упрощенной формуле В.П. Горячкина без первого члена, характеризующего так называемое «мертвое сопротивление» плуга, т.е.

$$P_{yк} = kab + \varepsilon abv_{пл}^2, \quad (8.2)$$

где a и b – глубина обработки и ширина захвата корпуса;

k – удельное сопротивление;

ε - коэффициент, зависящий от формы отвала и состояния почвы.

Значения коэффициентов k и ε (рассчитанные по методу наименьших квадратов) в зависимости от наличия предплужника и ширины захвата лемеха на вспашке стерни ячменя (рис. 8.4) приведены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Значения коэффициентов k и ε для укороченного корпуса

| Варианты опытов | Укороченный корпус | | Серийный корпус | |
|----------------------------|--------------------|---|--------------------|---|
| | $k, \text{Н/см}^2$ | $\varepsilon, \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4}$ | $k, \text{Н/см}^2$ | $\varepsilon, \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4}$ |
| Пахота без предплужника | | | | |
| $b_{пл} = 22,5 \text{ см}$ | 3,6 | 5650 | - | - |
| $b_{пл} = 35 \text{ см}$ | 4,0 | 6250 | - | - |
| Пахота с предплужником | | | | |
| $b_{пл} = 22,5 \text{ см}$ | 4,7 | 5950 | 7,3 | 3100 |
| $b_{пл} = 35 \text{ см}$ | 5,2 | 5420 | 7,8 | 3400 |

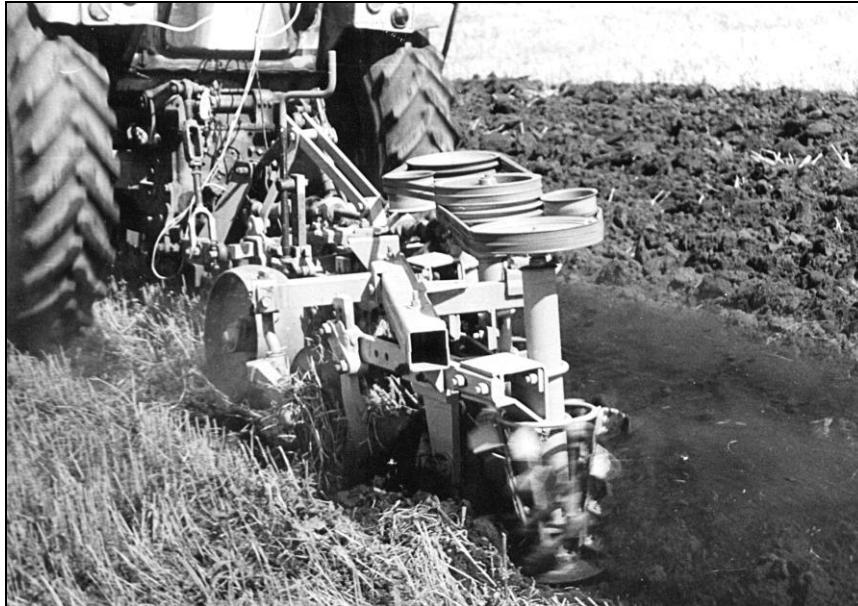


Рис. 8.4. Плуг ПВО-3-35 в работе

Испытания показали, что на тяговое сопротивление ротора значительное влияние оказывает положение оси его вращения относительно корпуса в поперечно-вертикальной плоскости. Наименьшее тяговое сопротивление было зафиксировано при расположении оси вращения ротора, проходящей через конец укороченного лемеха, т.е. на расстоянии 0,225 м от стенки борозды. При этом общая ширина захвата комбинированного корпуса составляла 0,35 м. Вынос оси ротора в сторону борозды на 0,05 м приводил к увеличению сопротивления его вращению в 2,5...3,6 раза.

Тяговое сопротивление комбинированного плужного корпуса P_{KK} равно сумме тяговых сопротивлений укороченного корпуса $P_{УК}$ и ротора $P_{ТР}$, т.е. $P_{KK} = P_{УК} + P_{ТР}$.

На рис. 8.5 показана зависимость тяговых сопротивлений комбинированного плужного корпуса $P_{ТР}$, $P_{УК}$ и $P_{КК}$ и серийного корпуса $P_{ПК}$ от поступательной скорости.

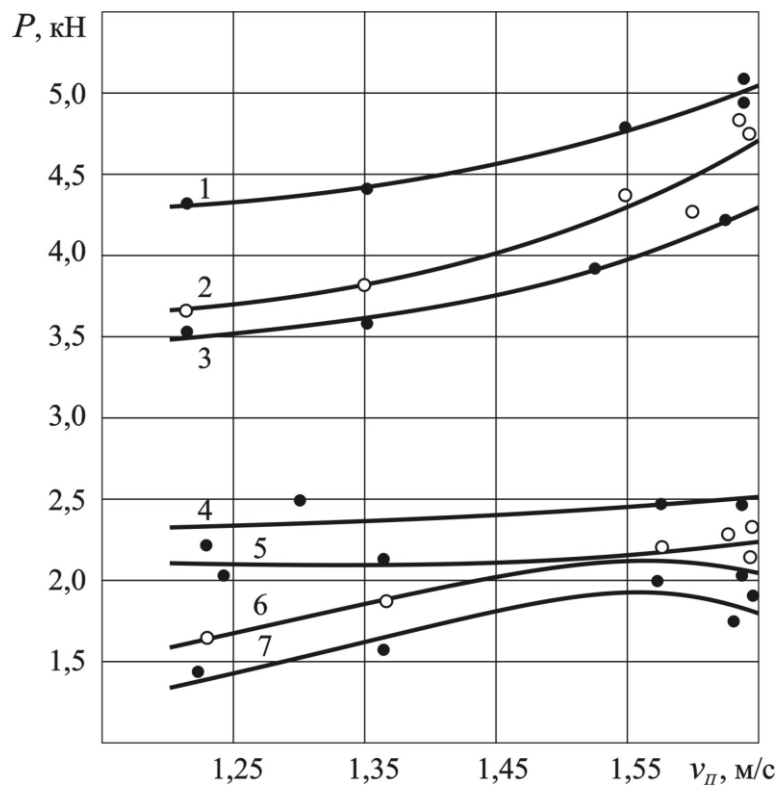


Рис. 8.5. Зависимости тягового сопротивления серийного и комбинированного корпусов от поступательной скорости:

- 1 – серийный корпус с предплужником $P_{ПК}$;
- 2 – комбинированный корпус с предплужником $P_{КК}$;
- 3 – комбинированный корпус без предплужника $P'_{КК}$;
- 4 – укороченный корпус со стандартным лемехом ($b_{л} = 35$ см) $P_{УК}$;
- 5 – укороченный корпус с укороченным лемехом ($b_{л} = 22,5$ см) $P_{УК}$;
- 6 – ротор в сочетании с корпусом с укороченным лемехом $P_{ТР}$;
- 7 – ротор в сочетании с корпусом со стандартным лемехом $P_{ТР}$

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

Замена укороченного лемеха ($b_{л} = 22,5$ см) на стандартный ($b_{л} = 35$ см) давало снижение тягового сопротивления на 8...30% для ротора №1 и на 15...30% для ротора №2. Это можно объяснить тем, что пласт подрезается полностью лемехом, а ротор производит лишь крошение и отбрасывание почвы.

Установка предплужника перед экспериментальным корпусом приводит к снижению тягового сопротивления ротора на 10...30%, т.к. на ротор в этом случае поступает меньше почвы, благодаря сбрасыванию части пласта на дно борозды, минуя ротор.

Зависимость тягового сопротивления ротора от частоты его вращения показана на рис. 8.6.

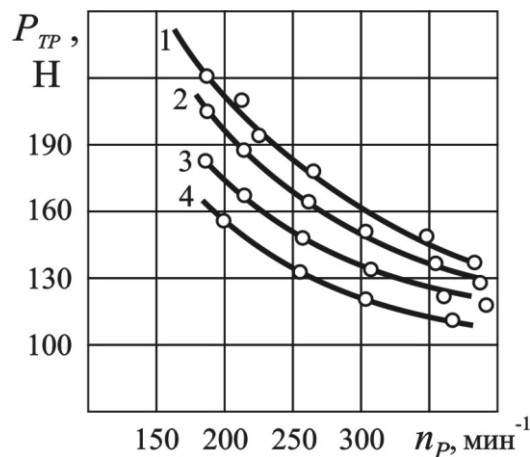


Рис. 8.6. Зависимость тягового сопротивления ротора P_{TP} от частоты вращения n_P (ротор №2, $b_{л} = 22,5$ см) при поступательной скорости плуга $v_{П}$: 1 – 1,24 м/с; 2 – 1,38 м/с; 3 – 1,59 м/с; 4 – 1,64 м/с

Из графика на рис. 8.6 следует, что с ростом частоты вращения n_P тяговое сопротивление P_{TP} ротора уменьшается. Это объясняется тем, что при постоянной поступательной скорости $v_{П}$ плуга увеличение n_P

приводит к уменьшению подачи s , а, следовательно, снижению тягового сопротивления, т.к. P_{TP} прямо пропорционально подаче (см. уравн.(7.6)).

Величина крутящего момента на валу ротора в общем случае зависит от поступательной скорости, частоты вращения, ширины захвата лемеха, наличия предплужника и формы ротора. Зависимость M_P от указанных параметров подчиняется тем же закономерностям, что и P_{TP} .

На рис. 8.7 показана зависимость крутящего момента M_P на валу ротора от поступательной скорости плуга $v_{П}$ при постоянной подаче.

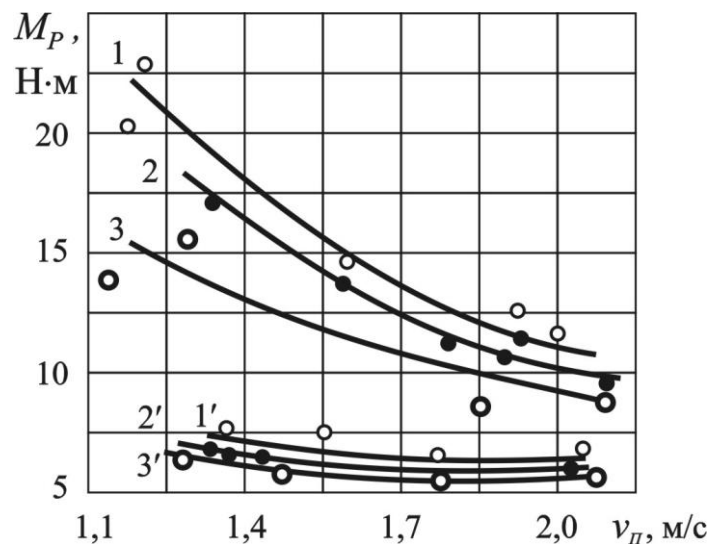


Рис. 8.7. Зависимость M_P от поступательной скорости плуга $v_{П}$:
 1 – ротор №8 без предплужника; 2 – ротор №7 без предплужника;
 3 – ротор №8 с предплужником; $b_{П} = 22,5$ см (1-3); $b_{П} = 35$ см (1'-3')

Из графика на рис. 8.7 следует, что с увеличением скорости плуга $v_{П}$ крутящий момент M_P снижается при работе с укороченным лемехом. При работе со стандартным лемехом M_P остается практически постоянным независимо от скорости и формы ротора. Однако величина

момента M_p при работе со стандартным лемехом в 2...3 раза меньше, чем при работе с укороченным лемехом.

Наибольшее влияние на крутящий момент M_p оказывает частота вращения n_p ротора (рис. 8.8). С увеличением n_p (при $v_{\Pi} = \text{const}$) крутящий момент на валу ротора сначала уменьшается, а затем растет. Это объясняется тем, что в начальный момент с увеличением n_p уменьшается подача на ротор и, соответственно, снижается момент M_p . А затем по мере роста n_p начинают превалировать энергозатраты на отбрасывание комков почвы.

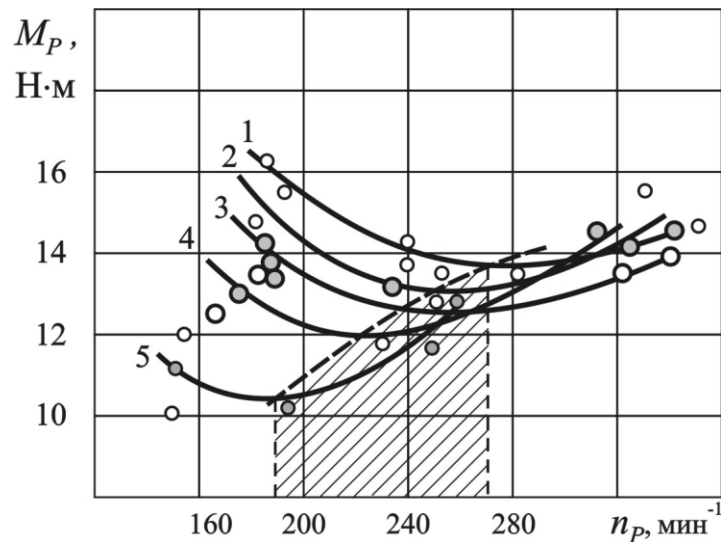


Рис. 8.8. Зависимость крутящего момента M_p от частоты вращения n_p ротора при скорости плуга v_{Π} :
 1 – 1,24 м/с; 2 – 1,38 м/с; 3 – 1,59 м/с; 4 – 1,64 м/с; 5 – 1,61 м/с

Минимальные значения крутящего момента M_p при различной поступательной скорости находятся в диапазоне частоты вращения 190...280 мин⁻¹ (на рис. 8.8 обозначены штриховкой). При этих значениях

частоты вращения ротора наблюдаются также более высокая степень крошения почвы и выравненность поля.

Из графиков на рис. 8.7 следует, что комбинированный корпус с зубовым ротором (№8) потребляет бóльшую мощность, чем корпус, ротор которого оснащен лопатками (№7). Объясняется это тем, что ротор с зубьями обеспечивает более высокую степень крошения почвы. Из графиков также следует, что установка предплужника перед комбинированным корпусом способствует снижению общей мощности. В других опытах (при вспашке стерни ячменя твердостью почвы 1,6...1,8 МПа и влажностью 23,6...26,3%) установка предплужника приводила к увеличению мощности на комбинированный корпус N_{KK} на 3...14%, в том числе возрастала мощность $N_{УК}$ на 15...20% (при $b_{л} = 22,5$ см) и на 18...22% (при $b_{л} = 35$ см).

Вместе с тем, тяговая мощность ротора $N_{ТР}$ снижалась на 10...40% для ротора №1, на 20...50% для ротора №2 и на 30...50 для ротора №8 (при установке предплужника).

Увеличение ширины захвата лемеха приводит к повышению $N_{УК}$ и снижению мощности, потребляемой ротором ($N_{ТР} + N_{Р}$). Так, при замене лемеха шириной захвата $b_{л} = 22,5$ см на лемех шириной $b_{л} = 35$ см мощность $N_{УК}$ увеличивается на 6...11% при работе без предплужника и на 4...9% при работе с предплужником. В то же время мощность $N_{Р}$ уменьшается в 1,6 раза для роторов №1 и 2; в 1,5...2 раза для ротора №7 и в 1,7...1.85 раза для ротора №8. Общая мощность для работы комбинированного корпуса со стандартным лемехом на 4...20% меньше по сравнению с комбинированным корпусом с укороченным лемехом.

Результаты исследований показывают, что роторы №7 и 8 обеспечивают более высокие агротехнические показатели по крошению

почвы, степени заделки растительных остатков и выравненности поверхности поля. Однако ротор с зубьями №8 потребляет энергии на 5...7% больше, чем ротор с лопатками №7.

Из данных испытаний следует, что на энергоемкость комбинированного корпуса существенное влияние оказывает положение оси вращения ротора относительно полевого обреза отвала. Так, если мощность необходимая для привода ротора N_P при общем захвате комбинированного корпуса равном $b = 35$ см составляет 10...40% общей мощности, то при $b = 40$ см мощность N_P составляет 35...70% мощности N_{KK} . Повышение мощности N_{KK} при выносе ротора в сторону борозды происходит за счет увеличения поступления массы почвы на ротор и, как следствие, увеличение ее крошения. Так, вынос ротора в сторону борозды на 0,125 м (при $b = 40$ см) приводит к уменьшению среднего размера почвенного комка в пределах 21,5...36 мм при работе с ротором №1 и на 22...27,5 мм при работе с ротором №2 (при поступательной скорости $v_{\Pi} = 1,67$ м/с).

Из графиков рис. 8.5 следует, что на тяговое сопротивление ротора существенное влияние оказывает ширина захвата лемеха, а тяговое сопротивление комбинированных корпусов в целом на 15...30% меньше, чем серийных плужных корпусов.

Общая мощность, потребляемая при работе комбинированного корпуса, равна
$$N_{KK} = N_{VK} + N_P + N_{TP}, \quad (8.3)$$

где $N_{VK} = P_{VK}v_{\Pi}$ - мощность укороченного корпуса;

$N_P = M_P n_P / 60$ - мощность на привод ротора;

$N_{TP} = P_{TP}v_{\Pi}$ - тяговая мощность ротора.

На рис. 8.9 показаны зависимости общей мощности для серийного и комбинированного корпусов от поступательной скорости, а также показаны зависимости составляющих общей мощности N_{KK} .

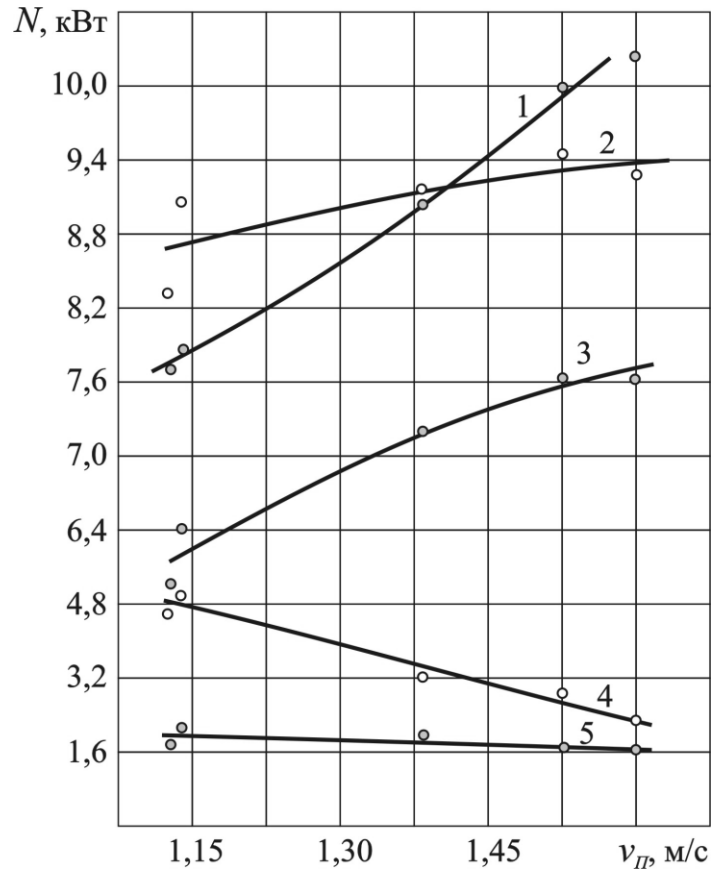


Рис. 8.9. Зависимость мощности $N_{\text{КК}}$ и $N_{\text{ПК}}$ от поступательной скорости $v_{\text{П}}$ (ротор №7 с укороченным лемехом $b_{\text{л}} = 22,5$ см без предплужника):
 1 – $N_{\text{ПК}}$; 2 – $N_{\text{КК}}$; 3 – $N_{\text{УК}}$; 4 – $N_{\text{Р}}$; 5 – $N_{\text{ТР}}$

Из графиков рис. 8.9 следует, что при малых поступательных скоростях (до 1,3...1,4 м/с) мощность $N_{\text{КК}}$, необходимая для работы комбинированного корпуса, несколько выше, чем $N_{\text{ПК}}$ для серийного корпуса. С повышением скорости, мощность $N_{\text{КК}}$ комбинированного корпуса растет заметно медленнее мощности $N_{\text{ПК}}$ серийного корпуса. При

скорости около 2 м/с мощность N_{KK} комбинированного корпуса меньше, чем мощность $N_{ПК}$ серийного корпуса на 10...15%.

Мощность $N_{УК}$ для работы корпуса с укороченным лемехом при увеличении поступательной скорости возрастает по вогнутой кривой. Мощность на привод ротора N_P снижается, а тяговая мощность ротора $N_{ТР}$ практически остается постоянной.

Зависимости мощности N_{KK} при работе со стандартным и укороченным лемехами от поступательной скорости показаны на рис. 8.10.

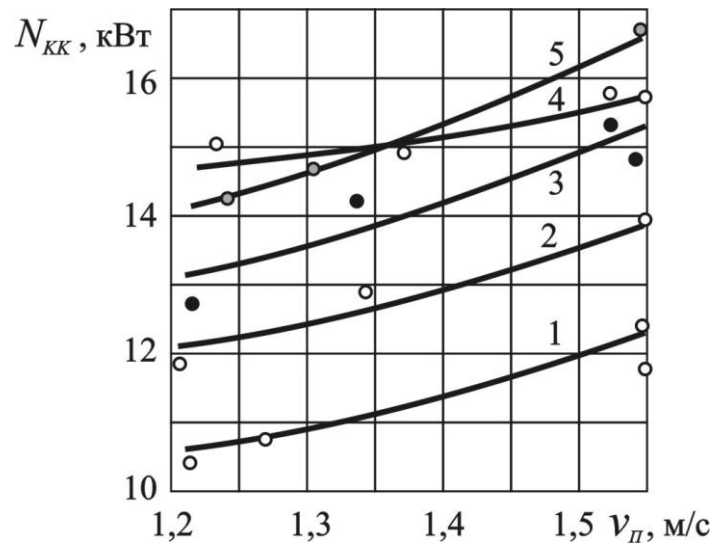


Рис. 8.10. Зависимости мощности N_{KK} комбинированного корпуса от поступательной скорости:

- 1 – с укороченным лемехом и предплужником (ротор №7);
- 2 – то же без предплужника;
- 3 – с укороченным лемехом и предплужником (ротор №8);
- 4 – со стандартным лемехом без предплужника (ротор №8);
- 5 – с укороченным лемехом без предплужника (ротор №8)

Определение влияния поступательной скорости плуга v_{II} на тяговое сопротивление P_{TP} ротора проводили при постоянной подаче s на зуб или лопатку (рис. 8.11).

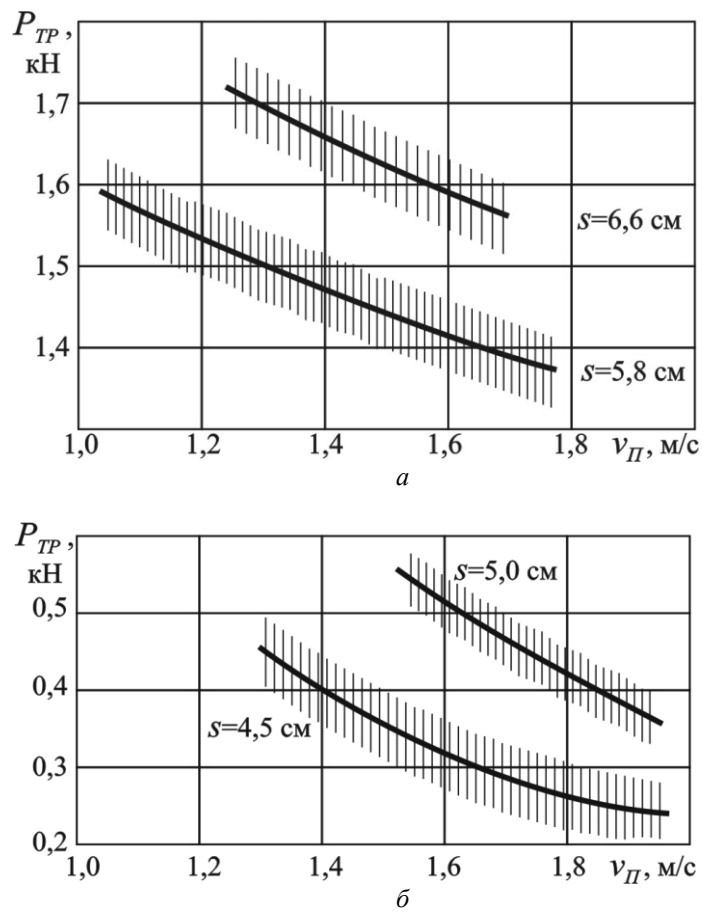


Рис. 8.11. Влияние поступательной скорости плуга v_{II} и подачи s на тяговое сопротивление ротора P_{TP} :
 а - стерня пшеницы; б - стерня ячменя

Из графиков на рис. 8.11 следует, что с повышением поступательной скорости v_{II} при $s = \text{const}$ тяговое сопротивление P_{TP} ротора снижается. Это объясняется тем, что с увеличением v_{II} уменьшается количество почвы, поступающей на ротор.

При этом с ростом величины подачи тяговое сопротивление повышается. Так, увеличение подачи s на 14% (с 5,8 до 6,6 см) приводило к повышению P_{TP} на 10...15% при вспашке стерни озимой пшеницы и на 50...60% на стерне ячменя.

В исследованном диапазоне поступательной скорости повышение v_{II} вызывало линейное увеличение удельного тягового сопротивления k (рис. 8.12).

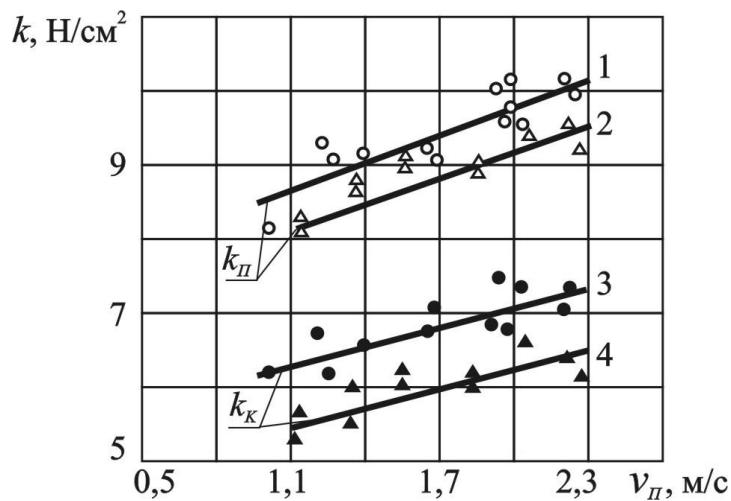


Рис. 8.12. Зависимость удельного тягового сопротивления k комбинированного и серийного корпусов от поступательной скорости v_{II} :
1 и 3 – пахота с предплужником; 2 и 4 – без предплужника

Влияние повышения скорости v_{II} на k в большей степени сказывалось на серийном корпусе, чем на экспериментальном. Это

объясняется значительным снижением P_{TP} благодаря наличию предплужника. Снижение удельного тягового сопротивления у комбинированного корпуса по сравнению с серийным составило 17...47%.

Наименьшее значение удельного сопротивления у всех вариантов комбинированных корпусов было получено при работе без предплужников со стандартным лемехом ($b_L = 35$ см).

Данные динамометрирования показывают, что форма ротора существенно влияет на его тяговое сопротивление. Наименьшее сопротивление имеет ротор с цилиндрическим каркасом. Тяговое сопротивление ротора №3 оказалось практически равным нулю. Однако роторы №3 и №4 не обеспечивали полного оборота пласта и заделки растительных остатков, т.е. не полностью удовлетворяют основным агротехническим требованиям на вспашку.

Из испытанных вариантов самым экономичным по энергоемкости оказался ротор №7, оснащенный лопатками, однако степень крошения почвы у него ниже, чем у ротора №8, имеющего такой же каркас, но оснащенный зубьями.

Ротор с зубьями потреблял в среднем на 5...7% больше энергии, чем ротор с лопатками, поэтому была проведена дополнительная оценка роторов №7 и №8 по удельной мощности, отнесенной к степени ξ дробления почвы (см. уравнение (5.46)). Коэффициент ξ можно ориентировочно рассчитать по формуле $\xi = \frac{d_{CP}}{D_{CP}}$.

Полученные значения удельной мощности $N_{y\partial} = \frac{N}{\xi}$ для двух вариантов роторов приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Удельная мощность роторов, кВт

| Поступательная скорость v_{II} , м/с | Удельная мощность роторов, кВт | |
|--|--------------------------------|----------|
| | Ротор №7 | Ротор №8 |
| 1,11 | 1,40 | 1,27 |
| 1,39 | 1,44 | 1,33 |
| 1,67 | 1,57 | 1,43 |
| 1,95 | 1,52 | 1,39 |

Как следует из данных таблицы, менее энергоемким по удельной мощности (с учетом степени крошения почвы) является ротор, оснащенный зубьями.

Таким образом, наиболее рациональной формой рабочего элемента ротора следует признать зубья квадратного сечения, т.к. такой ротор обеспечивает наименьшую удельную энергоемкость и наилучшее качество обработки почвы [85].

Эффективность комбинированных плугов с зубовыми роторами подтверждают графики на рис. 8.13, где показаны зависимости степени дробления ξ и крошения k_{KP} почвы, определенные стандартным способом (см. уравнение (4.6)), для плугов с серийными и комбинированными корпусами.

Из графиков рис. 8.13 следует, что степень крошения комбинированными плугами на 20...25% выше по сравнению с серийными. С увеличением поступательной скорости степень крошения комбинированными плугами снижается, а серийными повышается, что свидетельствует о более рациональном использовании энергии на крошение почвы у комбинированных плугов.

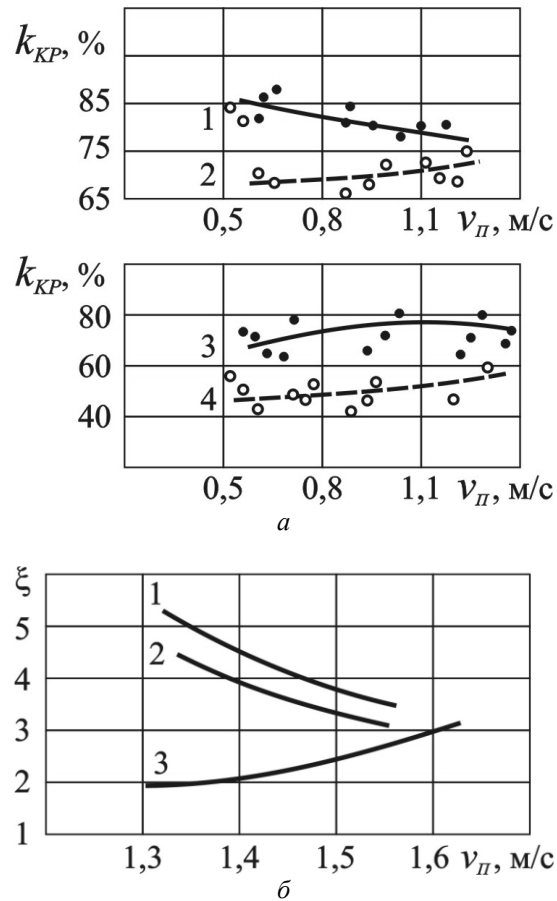


Рис. 8.13. Зависимости от поступательной скорости v_{PI} :
 а - степени крошения почвы k_{KP} для плугов:
 1 – ПОД-5-35; 2 – П-5-35М; 3 – ПВН-3-35; 4 – ПН-3-35;
 б - степени дробления ξ для плугов:
 1 – ПОД-5-35; 2 – ПОД-5-35 (роторы с лопатками); 3 – П-5-35М





8.3. Описание и техническая характеристика разработанных машин

В результате проведенных исследований разработаны четыре модели ротационных комбинированных плугов, две модели комбинированных фрез и три модели плугов с комбинированными корпусами.

Схемы и краткая техническая характеристика ротационных комбинированных плугов приведены в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Схемы и технические характеристики комбинированных ротационных плугов

| Марка плуга | МПТ-1,2 | ПР-2 | ПР-2,7 | ПР-4 |
|---------------------------------------|---|---|---|--|
| Схема плуга |  |  |  |  |
| Класс трактора | 0,9...2 | 1,4 | 3 | 5 |
| Марка трактора | Т-54В, Универсал - 445V | МТЗ-80 (82) | Т-150К | К-701 |
| Ширина захвата, см | 120 | 180 | 270...300 | 400...500 |
| Рабочие скорости, м/с | 0,56...1,12 | 0,83...1,53 | 1,25...2,36 | 1,53...2,50 |
| Мощность, передаваемая через ВОМ, кВт | 26...34 | 37...52 | 60...82 | 104...150 |
| Масса плуга, кг | 530 | 1000-1100 | 1500-1700 | 2000-2300 |

Ротационный плуг МПТ-1,2 (рис. 8.15) предназначен для вскапывания и фрезерования почвы в теплицах. Плуг разработан ВИСХОМ совместно с ГСКБ для защищенного грунта (г. Гатчина). Выпускался серийно с 1975 г. (А. с. 562230 СССР, МКИ А 01 В 33/02).

Ротационный плуг ПР-2 (ПР-200) (рис. 8.16) разработан ВИСХОМ. Выпущена опытная партия плугов, которая прошла широкие полевые испытания в различных регионах. В процессе испытаний конструктивная схема плуга и его параметры совершенствовались по количеству и видам установленных перед барабаном культиваторных лап, расположению опор, схеме трансмиссии и др. (А. с. 402337 СССР, МКИ А 01 В 33/16).

Ротационный плуг ПР-2,7 (рис. 8.17) разработан ВИСХОМ совместно с СКБ завода «Алтайсельмаш». Особенностью его является ножевой барабан, состоящий из двух половин, приводимых во вращение от ВОМ трактора, главный редуктор, карданные валы и боковые редукторы. Опытная партия плугов прошла государственные испытания в 1982 г.

Ротационный плуг ПР-4 (рис. 8.18) предназначен для работы с тракторами К-700 и К-701. Левая и правая половины этого плуга имеют собственные рамы, которые соединены между собой дополнительной рамой. При необходимости плуг можно разъединить и агрегатировать обе половины отдельно с тракторами меньшей мощности.

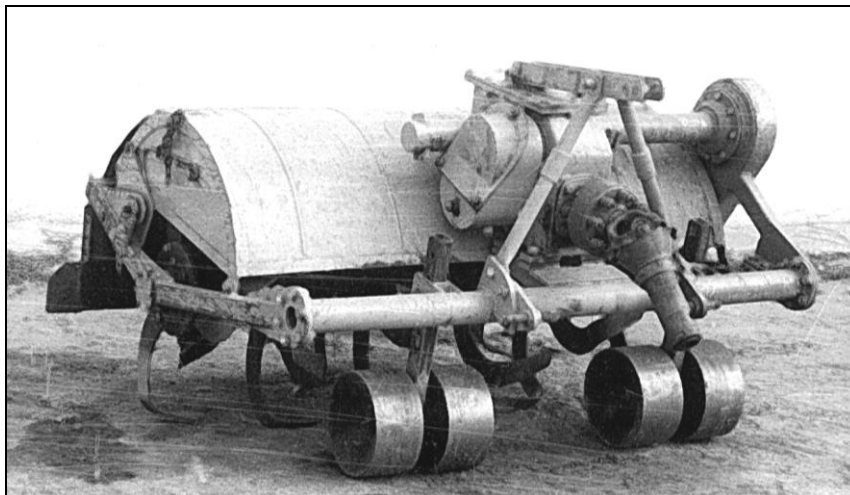


Рис. 8.15. Ротационный плуг МПТ-1,2



Рис. 8.16. Ротационный плуг ПР-2 (ПР-200)



Рис. 8.17. Ротационный плуг ПР-2,7



Рис. 8.18. Ротационный плуг ПР-4

Для обработки тяжелых пересушенных почв ВИСХОМ совместно с ГСКБ по культиваторам и сцепкам (г. Ростов-на-Дону) разработал фрезерный культиватор-глубококорыхлитель КФГ-3,6 серийно выпускаемый с 1980 г. На культиваторе установлены два ряда культиваторных лап: спереди и сзади фрезерного барабана. На базе этого культиватора совместно с ГСКБ по культиваторам и сцепкам, а также Кировоградским проектно-конструкторским институтом разработан и поставлен на производство с 1981 г. комбинированный фрезерно-посевной агрегат КА-3,6, предназначенный для предпосевной обработки и посева зерновых культур.

В 1982 г. прошел государственные испытания и рекомендован в производство комбинированный агрегат АКР-3,6 для предпосевной обработки почвы и измельчения грубостебельных культур (кукурузы, подсолнечника, сои и др.). Агрегат разработан ВИСХОМ, ВИМ, и ГСКБ по культиваторам и сцепкам.

Описание моделей разработанных плугов с комбинированными корпусами приведено в главе 1 (см. табл. 1.4 и рис. 1.10-1.13).

8.4. Агротехническая эффективность комбинированных ротационных машин и плугов с комбинированными корпусами

Макетные, опытные и серийные образцы разработанных с нашим участием машин были испытаны на дерново-подзолистых, супесчаных и карбонатных глинистых почвах (Московская, Тверская и Ленинградская обл.), на выщелоченных черноземах среднесуглинистого механического состава (Липецкая, Воронежская обл.), южных малогумусных черноземах (Одесская обл.), темно-каштановых почвах (Херсонская обл.), предкавказском слабовыщелоченном черноземе (Краснодарский край) и других.

Агротехническая оценка комбинированных машин проводилась в соответствии с требованиями стандартов [14, 73]. Также дополнительно в зависимости от специфики применения той или иной машины (старопахотные земли, жнивье, травяной пласт, теплицы и т.п.) определялся ряд дополнительных показателей.

К основным агротехническим показателям относили: крошение пласта, заделка растительных остатков, глыбистость и гребнистость поверхности поля, и другие.

По ряду машин проводились исследования по влиянию их работы на урожайность сельскохозяйственных культур.

Крошение почвы

В тексте приведены данные по сравнительной оценке степени крошения почвы ротационными и лемешными плугами. В дополнение к этим показателям, в табл. 8.5 и 8.6 приведен фракционный состав, степень крошения $k_{кр}$ и размер средневзвешенного комка $d_{ср}$ почвы для ротационного и лемешного плугов по данным испытаний в трех регионах.

Данные фракционного анализа для $k_{кр}$ и $d_{ср}$ свидетельствуют о более высоком качестве крошения почвы ротационными плугами по сравнению с крошением лемешными плугами. Так, даже на пахотных режимах (при подаче 0,14...0,25 м) степень крошения почвы ротационными плугами изменяется в пределах 65...83%, а для лемешных плугов в тех же условиях $k_{кр}$ составляет 55...66%.

Приведенные данные также подтверждают вывод о существенном влиянии предварительного рыхления на степень крошения почвы ротационными плугами.

Таблица 8.5

Крошение почвы ротационным и лемешным плугами

| V _{пл} , м/с | S, м | Размер и частота P _i фракций, % | | | | | | | Степень крошения, k _{кр} , % | d _{ср} , мм | |
|---|-------|--|--------|-------|-------|-------|-------|--------|---|-------------------------|-------|
| | | 0,25 | 0,25-1 | 1-10 | 10-20 | 20-30 | 30-50 | 50-100 | | | 100 |
| Паровое поле, Московская обл. | | | | | | | | | | | |
| Плуг РП-200 (a = a _{пл} = 0,20 м; B = 1,04 м) | | | | | | | | | | | |
| 1,33 | 0,125 | 7,2 | 25,1 | 28,4 | 10,2 | 8,1 | 9,15 | 9,6 | 1,39 | 88,2 | 18,7 |
| 1,80 | 0,125 | 7,2 | 16,45 | 20,65 | 10,76 | 9,8 | 9,3 | 11,65 | 1,74 | 87,4 | 21,5 |
| 1,80 | 0,125 | 5,2 | 12,3 | 15,0 | 14,2 | 18,3 | 16,4 | 20,7 | 2,88 | 76,2 | 31,2 |
| Естественно сложенная почва (то же поле, без предварительного рыхления) | | | | | | | | | | | |
| Плуг ПН-3-35 (a = 0,20 м) | | | | | | | | | | | |
| | | 0,42 | 1,67 | 5,17 | 0,92 | 2,57 | 2,11 | 3,2 | 83,94 | 12,86 | 88,5 |
| 1,03 | - | 5,2 | 14,55 | 21,4 | 9,15 | 7,93 | 9,82 | 13,76 | 22,0 | 65,4 | 61,8 |
| Стерня пшеницы, Одесская обл. | | | | | | | | | | | |
| Плуг РП-200 (a = a _{пл} = 0,20 м; B = 1,04 м) | | | | | | | | | | | |
| 1,18 | 0,125 | 3,19 | 5,54 | 36,86 | 9,7 | 9,4 | 9,5 | 18,7 | 7,1 | 74,2 | 37,2 |
| 1,11 | 0,172 | 3,28 | 6,9 | 29,7 | 11,2 | 7,2 | 9,0 | 12,2 | 20,2 | 67,5 | 57,9 |
| Плуг ПН-3-35 (a = 0,20 м) | | | | | | | | | | | |
| 1,13 | - | 1,3 | 2,35 | 18,17 | 5,26 | 4,98 | 5,59 | 8,5 | 53,9 | 37,61 | 119,0 |
| 1,85 | - | 1,81 | 2,25 | 17,58 | 6,76 | 5,67 | 5,2 | 13,3 | 47,2 | 39,5 | 110,7 |
| Естественно сложенная почва (то же поле, без предварительного рыхления) | | | | | | | | | | | |
| | | 0,57 | 2,17 | 6,65 | 1,68 | 2,06 | 1,38 | 2,69 | 82,8 | 14,5 | 169,2 |

Таблица 8.6

Крошение почвы ротационным и лемешным плугами

| $V_{ПЗ}$, м/с | S , м | $a_{ПЗ}$, м | Размер и частота P_i фракций, % | | | | Степень крошения, $k_{кр}$, % | $d_{ср}$, мм | |
|---|---------|--------------|-----------------------------------|--------|-------|-------|--------------------------------|---------------|-------|
| | | | 100 | 100-50 | 50-30 | 30-20 | | | 20-10 |
| Стерня пшеницы, Херсонская обл. | | | | | | | | | |
| Плуг РП-200 ($a = 0,27$ м; $B = 0,92$ м) | | | | | | | | | |
| 1,52 | 0,085 | 0 | - | 2,37 | 2,23 | 4,34 | 91,0 | 95,6 | 17,4 |
| 1,52 | 0,085 | 0,14 | - | 2,28 | 4,80 | 6,60 | 86,32 | 92,9 | 18,1 |
| 1,54 | 0,085 | 0,185 | - | 3,15 | 6,42 | 5,67 | 64,76 | 90,3 | 19,1 |
| 1,51 | 0,085 | 0,23 | - | 3,04 | 7,10 | 6,63 | 93,23 | 89,9 | 19,4 |
| 2,11 | 0,125 | 0 | - | 6,32 | 4,62 | 7,90 | 81,16 | 89,0 | 20,4 |
| 1,04 | 0,125 | 0,14 | - | 3,88 | 7,16 | 9,47 | 79,49 | 88,9 | 21,5 |
| 1,68 | 0,125 | 0,185 | 3,22 | 3,08 | 5,58 | 7,06 | 81,06 | 88,1 | 25,5 |
| 1,03 | 0,125 | 0,23 | - | 7,02 | 9,45 | 9,24 | 74,28 | 83,5 | 25,8 |
| 1,12 | 0,190 | 0 | 1,40 | 7,36 | 7,93 | 7,93 | 75,38 | 83,2 | 24,1 |
| Естественно сложенная почва (то же поле, без предварительного рыхления) | | | | | | | | | |
| | | | 52,2 | 4,35 | 5,35 | 5,36 | 32,80 | 37,90 | 89,90 |

На рис. 8.19 показаны зависимости степени дробления ξ почвы и размера d_{CP} средневзвешенного комка почвы от поступательной скорости комбинированного и лемешного плугов. Из графиков следует, что при постоянной частоте вращения ротора ($n_p = \text{const}$) с ростом поступательной скорости орудия v_{II} степень дробления комбинированным плугом снижается, а серийным – возрастает.

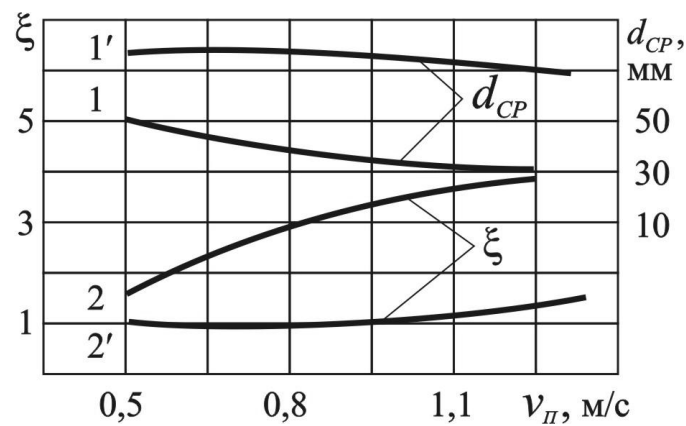


Рис. 8.19. Зависимости степени дробления ξ и размера средневзвешенного комка d_{CP} почвы от поступательной скорости v_{II} плуга при $s = \text{const}$:
1', 2' - плуг ПН-3-35; 1,2 – плуг ПВН-3-35

При скорости v_{II} около 1,55 м/с степень дробления почвы обоими плугами сравнивается. Это объясняется тем, что с увеличением скорости v_{II} при постоянной частоте вращения n_p подача на рабочий элемент ротора также увеличивается. При постоянной подаче степень дробления почвы комбинированным плугом с ростом скорости v_{II} хотя и снижается, но остается значительно выше по сравнению с лемешным плугом.

Заделка растительных остатков

Полнота заделки растительных остатков (стерни, сорняков) в почву является важным агротехническим показателем качества работы плугов. Согласно действующим стандартам лемешно-отвальные плуги должны полностью заделывать в почву растительные остатки на глубину до 0,14 м. Степень заделки растительных остатков оценивается коэффициентом

$$k_{\text{зад}} = \frac{a_{\text{зад}}}{a}, \text{ где } a_{\text{зад}} - \text{глубина заделки; } a - \text{глубина пахоты [73].}$$

Как показали испытания в различных регионах и на разных типах почв [56] ротационные плуги не обеспечивают полной заделки растительных остатков. Количество незаделанных растительных остатков после прохода ротационного плуга изменяется в пределах от 3% до 14% на пахотных режимах, а на режимах фрезерования – от 2,75% и выше.

На рис. 8.20, *а* показана работа ротационного плуга на пахотном режиме, а на рис. 8.20, *б* – поле после прохода ротационного плуга на фрезерном режиме.

На рис. 8.21 представлена зависимость степени m_p незаделанных растительных остатков от подачи s . Опыты проводились на стерне зерновых при влажности 10...25% и твердости почвы 0,08...2,7 МПа в слое 0,30 м.

Из графика видно, что при увеличении подачи количество незаделанных растительных остатков возрастает, особенно на пахотных режимах, что свидетельствует о неполном обороте отрезанных элементов пласта рабочими органами. Это подтверждает также рис. 8.20 *а*. На фрезерных режимах растительные остатки лучше заделываются в почву

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

(см. рис. 8.20 б). Предварительное рыхление почвы улучшает степень заделки растительных остатков: m_p уменьшается с 15% до 5%.



а



б

Рис. 8.20. Фрагменты работы ротационного плуга:
а – на пахотном режиме; *б* – на фрезерном режиме

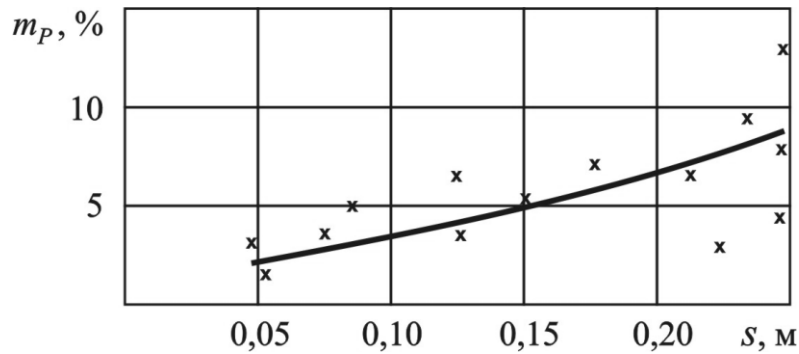


Рис. 8.21. Зависимость степени незаделанных растительных остатков m_p от подачи s

Статистическая обработка данных степени заделки растительных остатков $k_{зад}$ показала, что на пахотных режимах она подчиняется нормальному закону распределения с параметрами $m_x = 47\%$ и $\sigma_x = 3,74\%$, поэтому вероятность попадания случайной величины $k_{зад}$ в интервал значений $90\% < k_{зад} < 100\%$ составляет 0,645 [15]. То есть при обработке стернового поля ротационным плугом только 64,5% площади будут удовлетворять требованию степени заделки растительных остатков на уровне 90...100%.

Следует отметить существенную разницу в характере заделки растительных остатков ротационными и лемешно-отвальными плугами. Если лемешно-отвальный плуг укладывает растительные остатки компактной массой на дно борозды, то ротационный плуг равномерно распределяет их по всему вспаханному слою, и тем самым выполняет мульчирующую обработку, что наглядно видно на рис. 8.22.

Заделка растительных остатков плугами с комбинированными корпусами практически одинакова с лемешными плугами.



Рис. 8.22. Характер перемешивания растительных остатков с почвой после обработки ротационным плугом (мульчирующая обработка)

Результаты экспериментального определения глыбистости, вспушенности и гребнистости при различных режимах работы ротационных плугов в сравнении с лемешно-отвальными плугами приведены в табл. 8.7.

Из этих данных следует, что ротационные плуги на режимах пахоты дают такую же глыбистость почвы, как и лемешные (14,6...24,5%). На режиме фрезерования ротационные плуги превосходят по глыбистости почвы лемешные плуги. По гребнистости и вспушенности поля на режиме пахоты ротационные плуги несколько уступают лемешным плугам, а на режимах фрезерования – превосходят лемешные плуги.

Таблица 8.7

Глыбистость, вспушенность и гребнистость почвы при различных вариантах обработки, %

| Тип почвы | Марка плуга, режим работы | Глыбистость | Вспушенность | Гребнистость |
|--|---------------------------|-------------|--------------|--------------|
| Дерново-подзолистая, среднего механического состава | РП-200, пахота | 9,66 | 40,4 | 5,0 |
| | РП-200, пахота | 14,67 | 50,9 | 4,7 |
| | РП-200, фрезерование | 3,76 | 61,9 | 3,7 |
| | ПН-3-35 | 13,64 | 39,6 | 7,2 |
| | РП-200, пахота | 24,50 | 38,5 | 10,14 |
| | РП-200, фрезерование | 14,25 | 33,3 | 2,73 |
| | РП-200, фрезерование | 15,80 | 44,7 | 7,71 |
| | ПН-3-35 | 24,00 | 38,5 | 11,47 |
| Выщелоченный чернозем, средне-суглинистого механического состава | РП-200, фрезерование | 16,20 | 35,45 | 2,85 |
| | РП-200, пахота | 15,20 | 35,55 | 4,10 |
| | РП-200, фрезерование | 6,89 | 47,10 | 0,42 |
| | ПН-3-35 | 27,90 | 40,10 | 8,70 |

Качество обработки почвы рисовых чеков, залитых водой, ротационными плугами, по показателям заделки растительных остатков, выравнивания поверхности поля значительно выше, чем качество обработки тех же чеков посуху лемешными плугами (рис. 8.23) [56].



Рис. 8.23. Обработка рисового чека залитого водой ротационным плугом ПР-2,7

По показателям гребнистости, глыбистости, вспушенности обработанного поля плуги с комбинированными корпусами значительно превосходят лемешные плуги (рис. 8.24) [85].

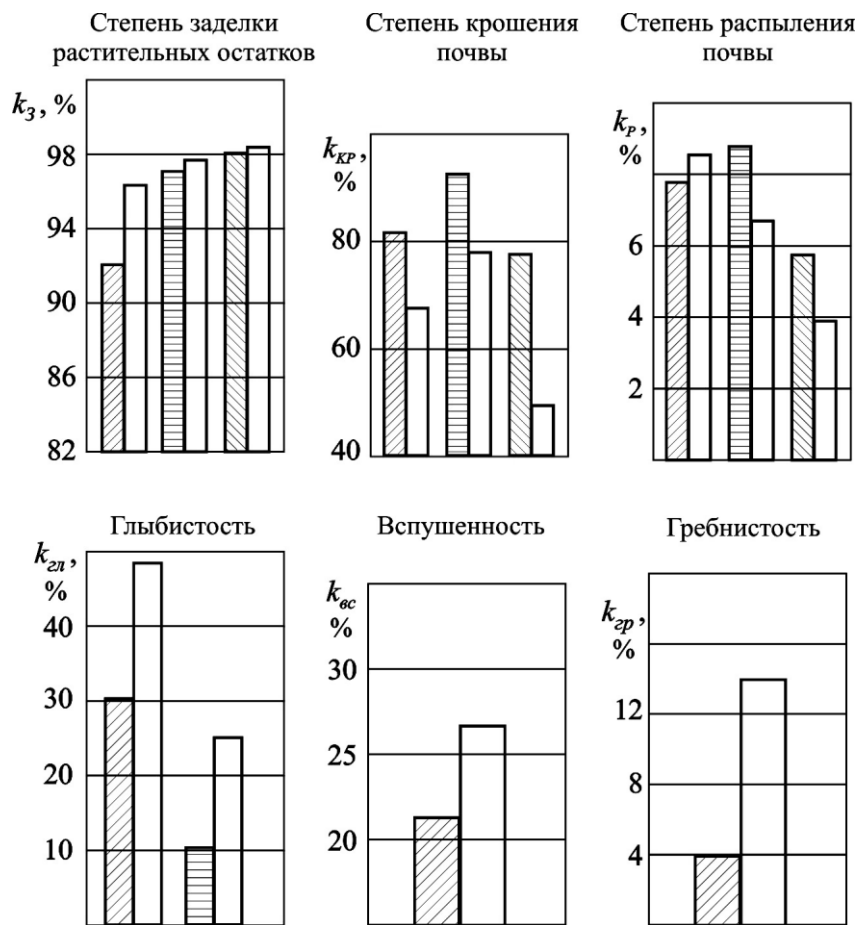


Рис. 8.24. Агротехнические показатели работы экспериментальных и серийных плугов:

- плуг ПОД-5-35, $v_{II}=1,8$ м/с;
 - плуг ПОД-4-40, $v_{II}=2,11$ м/с;
 - плуг ПВН-3-35, $v_{II}=1,25$ м/с;
 - лемешно-отвалный плуг

Так, если после прохода плуга ПОД-5-35 глыбистость не превышала 22...39%, то после прохода плуга П-5-35М она составляла 50...64%. Гребнистость поля после прохода плуга ПОД-5-35 с ротором №1 составляла 3,9...5,0%, а после лемешного плуга этот показатель достигал 17,8%. Коэффициент вспушенности поля после прохода плуга ПОД-5-35 с ротором №1 изменялся в пределах 16,5...24,3%, а с ротором №2 – 11,9...21,0%. Вспушенность почвы после лемешного плуга была в пределах 22,2...27,3%. Меньшая вспушенность почвы после обработки комбинированными плугами объясняется лучшим крошением почвы и более плотной укладкой отбрасываемых частиц почвы.

Степень распыления почвы k_p комбинированными и лемешно-отвальными плугами примерно одинакова.

Высота гребней, оставляемых после комбинированных плугов, в 2...3,5 раза меньше, чем после серийных плугов: комбинированные плуги дают слитную поверхность пашни. При работе на среднем суглинке они за один проход полностью подготавливают почву под посев, тогда как после вспашки лемешно-отвальным плугом необходима дополнительная обработка культиватором и боронами.

Влияние ротационной и комбинированной обработки почвы на урожайность сельскохозяйственных культур

Для определения влияния новых технологий обработки почвы на урожайность возделываемых культур экспериментальные плуги были испытаны в различных почвенно-климатических зонах рядом научно-исследовательских институтов. Наиболее полные и многолетние исследования были проведены научно-исследовательским агрофизическим институтом (АФИ). Опыты закладывались на дерново-подзолистых, супесчаных и карбонатных глинистых почвах. Результаты этих испытаний позволили сделать следующие основные выводы [70]:

1. Предпосевная ротационная обработка почвы под пропашные и овощные культуры, сопровождаемая интенсивным крошением и тщательным перемешиванием почвы, существенно сказывается на улучшении ее водно-физических и биологических показателей.

После прохода плуга РП-200 на режиме фрезерования степень крошения составляет 80...90%, в то время как после дискования, вспашки и дополнительного двукратного дискования с боронованием степень крошения достигает лишь 76...85%. Ротационная обработка почвы не вызывает уменьшения водопрочных агрегатов в почве. Количество пылевидных частиц в почве хотя и увеличивается, но по истечении 3-4 недель структура восстанавливается и различия в содержании пыли по вариантам опытов не наблюдается.

Процессы биологической активности через 18 суток после обработки были выше, чем на контроле. Особенно резко проявились различия в разложении целлюлозной пленки и газовом обмене. Отмечается, что по истечении 50 суток и более различия в биологической активности уменьшаются, хотя физические показатели почвы сохраняют преимущество в сравнении с контролем.

2. По сравнению с традиционной технологией ротационная обработка почвы обеспечивает повышение урожая. Проводимые опыты сопоставлялись с результатами обработки почвы различными орудиями: лемешный плуг ПКС-4-35 (контроль), болотная фреза ФБН-0,9, ротационный плуг РР-200, комбинированный плуг ПВО-2-35, дисковая борона БДТ-2,2. Данные по сбору урожая кукурузы (зеленой массы) представлены в табл. 8.6.

Обработка почвы ротационным плугом РР-200, как видно из табл. 8.8, дает наибольшую прибавку урожая зеленой массы кукурузы. В других

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

опытах, применение ротационного плуга обеспечило прибавку урожая картофеля на 10...18% (17...22 ц/га), моркови на 12% (67 ц/га).

Таблица 8.8

Урожай кукурузы при обработке почвы различными орудиями

| Вариант орудия | Урожай, ц/га | Прибавка урожая | |
|----------------|--------------|-----------------|-----|
| | | ц/га | % |
| ПКС-4-35 | 400±4,5 | - | 100 |
| ФБН-0,9 | 539±19,0 | +79,0 | 117 |
| ПР-200 | 562±24,0 | +96,0 | 122 |
| ПВО-2-35 | 465±21,6 | +5,0 | 101 |
| БДТ-2,2 | 415±7,5 | -45,0 | 94 |

Высокая эффективность ротационной обработки почвы позволила АФИ рекомендовать ее для широкого внедрения под картофель, овощные и пропашные культуры.

ВНИИриса (г. Краснодар) исследовал работу ротационного плуга на основной и предпосевной обработке рисовых чеков при влажности, достигающей 32...34%. Если при таком содержании влаги пахотный агрегат с лемешным плугом не может работать из-за низкого сцепления трактора с почвой, то агрегат с ротационным плугом показал хорошую проходимость и результаты обработки почвы.

Применение ротационного плуга обеспечивало высокое качество разделки пласта, не нарушало спланированного рельефа чека и резко сокращало число операций. Так, на контрольных участках после зяблевой пахоты плугом ПН-4-35 необходимо было проведение весной двукратного рыхления культиватором-рыхлителем на глубину 16...18 см, перепашки на 12...14 см, дискования на 8...10 см и эксплуатационной планировки

грейдером. На опытных участках, вспаханных плугом ПР-200, перечисленные операции весной не проводили. Сокращение числа операций обработки почвы не только не снизило урожай, но даже наблюдалась тенденция к повышению сбора риса.

Испытания плуга ПР-200 на Дальневосточной и Кзыл-Ординской МИС показали, что ротационная обработка почвы может быть рекомендована при возделывании риса и в этих зонах.

Результаты опытов, проведенных Одесским СХИ позволили установить, что ротационная обработка почвы малогумусного чернозема в сравнении с традиционной технологией увеличивает накопление нитратного азота в начале весенней вегетации озимой пшеницы и дает повышение полевой всхожести зерновых на 21...32%. Все это обеспечило повышение урожайности озимой пшеницы на 44...50% (7...8 ц/га).

Научно-исследовательский институт хлопководства исследовал эффективность плуга РП-200 при подготовке почвы под хлопчатник. Зяблевая вспашка ротационным плугом позволила уменьшить число весенних предпосевных обработок почвы.

Кафедра земледелия Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева на базе учхоза «Михайловское» Московской области проводила исследование ротационного плуга ПР-2,7 и комбинированного агрегата КА-3,6. Изучались варианты обработки дерново-подзолистой, среднесуглинистой почвы, приведенные в табл. 8.9.

В опытах сравнивались два варианта севооборота: зерновой (пар викоовсяной – озимая пшеница – озимая пшеница – ячмень) и плодосменный (пар викоовсяной – озимая пшеница – картофель – ячмень).

Варианты обработки почвы

| Вариант обработки | Основная обработка | Предпосевная обработка |
|-------------------|---|------------------------------------|
| Нулевая | Без обработки | КА-3,6 |
| Ротационная | ПР-2,7 в режиме вспашки на глубину 20...22 см | КА-3,6 |
| Комбинированная | Лушение на 5...6 см + вспашка ПН-4-35 на 20...22 см | КА-3,6 |
| Контроль | Лушение на 5...6 см + вспашка ПН-4-35 на 20...22 см | КПС-4 + боронование + посев СЗ-3,6 |

Сравнение качества работы ротационного и лемешного плугов показало преимущества первого по ряду показателей. Так, применение плуга ПР-2,7 на режиме пахоты обеспечило лучшее крошение и более тщательное перемешивание слоев почвы, что позволило более равномерно распределять в пахотном слое минеральные удобрения.

Для более разносторонней оценки качества работы агрегата КА-3,6 схема опыта предусматривала обработку почвы и посев по зяби, поднятой плугами ПР-2,7 и ПН-4-35, а также по не вспаханной почве. Предпосевная обработка почвы и посев комбинированным агрегатом позволили получить более равномерную глубину заделки семян.

В течение всей вегетации викоовсяной смеси на делянках, обработанных комбинированным агрегатом, сохранилась меньшая твердость почвенного слоя, чем на контрольных делянках. Не обнаружено различий по влажности почвы, содержанию водопрочной структуры, распределению корневой системы в пахотном и подпахотном горизонтах в разных вариантах опытов.

Решающее влияние на формирование урожая викоовсяной смеси оказала глубина заделки минеральных удобрений. Активное

перемешивание пахотного слоя плугом ПР-2,7 и совмещение предпосевной обработки почвы с посевом обеспечили прибавку урожая зеленой массы викоовсяной смеси на 40%, прибавку урожая ячменя – 26...40%.

Исследования влияния на урожайность кукурузы и картофеля обработки почвы комбинированными плугами проводились в НИИСХ Центральных районов Нечерноземной зоны (г. Немчиновка, Московская обл.). Опыты ставились на среднесуглинистых почвах. При зяблевой обработке почвы комбинированный плуг ПОД-4-35 в сравнении с плугом ПН-4-35 давал несколько лучшее качество разделки почвы: снижение глыбистости и гребнистости пашни, повышение крошения почвы.

За счет лучшего качества обработки почвы наблюдалось повышение урожая картофеля на 8,7 ц/га и кукурузы на 17,6 ц/га.

На Западной МИС опыты проводились по двум культурам – ячменю и картофелю. Весной на предпосевной обработке почвы под ячмень в качестве контроля применяли плуг ПН-4-35 с дополнительным боронованием в два следа, а под картофель – плуг ПН-4-35, дисковый лущильник ЛД-10 и боронование в два следа. После прохода комбинированного плуга поле было полностью готово под посев и не нуждалось в дополнительной обработке.

Прибавка урожая по делянкам, обработанным плугом ПВО-3-35 с комбинированными корпусами, составила: ячменя на зерно 9,3%, соломы ячменя – 10,9%, картофеля – 12%. В следующем сезоне по такой же схеме обработки прибавка урожая картофеля на опытном поле достигла 26,2%.

Прибавка урожая достигается за счет лучшего крошения почвы, тщательного распределения и перемешивания минеральных удобрений в пахотном слое комбинированным плугом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ различных направлений развития почвообрабатывающих орудий показал, что одним из эффективных и перспективных средств и способов обработки почвы является применение машин с вращательным движением рабочих органов с приводом от ВОМ трактора. Обработка почвы приводными рабочими органами имеет ряд агротехнических и технических преимуществ: - в зависимости от кинематических режимов (соотношения окружной и поступательной скоростей, т.е. пахотный или фрезерный режим) они могут за один проход обеспечивать основную или предпосевную подготовку почвы; - ротационная обработка обеспечивает высокий структурообразующий эффект и оптимальное сложение обработанного слоя почвы, в нем активнее протекают обменные процессы, что способствует получению более высоких урожаев сельскохозяйственных культур; - приводные рабочие органы имеют более высокий КПД относительно степени крошения почвы по сравнению с традиционными машинами, а также более высокий механический КПД по сравнению с орудиями которые получают необходимую мощность через прицепное устройство трактора.

Однако почвообрабатывающие машины с приводными рабочими органами имеют высокую общую энергоемкость и меньшую производительность, что сдерживает их широкое распространение. Причины высокой энергоемкости приводных рабочих органов установлены на основе теоретических и экспериментальных исследований, и связаны с высокими скоростями резания и степенью крошения, большими суммарной длиной режущей кромки и дальностью отбрасывания отрезанных стружек. Установлено, что эффективным приемом снижения энергоемкости ротационной обработки является изменение состояния монолита обрабатываемой почвы путем предварительного рыхления тяговыми рабочими органами, либо путем доведения ее до переувлажненного состояния, например, как это происходит в рисовых чеках.

Взаимодействие приводных ротационных рабочих органов с почвой носит ударный характер. Высокие скорости соударения рабочего органа и почвы увеличивают долю динамических составляющих сопротивления резанию пласта почвы, обусловленные упругостью и реологическим характером свойств почвы - в соответствии с классической механикой, или коэффициентом передачи энергии - в соответствии с волновой теорией удара. Предварительное рыхление и повышение влажности почвы уменьшает скорость отбрасывания стружки и снижает необходимый крутящий момент на ВОМ. Степень предварительного рыхления почвы следует регулировать в зависимости от пахотного или фрезерного режимов работы.

Максимальный механический КПД почвообрабатывающего агрегата с двухпоточным потреблением энергии от ВОМ и прицепного устройства достигается, когда мощность на преодоление горизонтальной составляющей силы резания будет равна мощности на преодоление сопротивления перекачиванию машины и трактора, и тогда буксование движителя трактора равно нулю или весьма незначительно.

Испытания комбинированных плугов типа «ПВО» с вращающимися отвалами и комбинированных ротационных плугов типа «РП-200», в различных почвенно-климатических зонах, показали их агрономическую эффективность. В результате их применения на 15÷20% повышается урожайность ряда сельскохозяйственных культур - картофеля, озимой пшеницы, риса. Количество пылевидных частиц, образующихся при работе комбинированных плугов, незначительно превышает это количество при работе отвального плуга, и не может ограничивать их использование. Выявлены наиболее перспективные области применения комбинированных плугов, а именно, поливное земледелие, овощеводство открытого и закрытого грунта, подготовка почв в садах и на склонах, обработка тяжелых сухих и переувлажненных почв, рисовых чеков.

В будущем, тягово-приводные орудия, как эффективное средство структурирования почвы в широком диапазоне ее состояний, займут более широкое место в парке сельхозмашин.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 406138 СССР, МКИ G 01 M 19/00 Установка для исследования рабочих органов ротационных машин / И.М. Панов, В.А. Юзбашев, В.Д. Митрошенкова. - № 1671169/30-15; Заявл. 07.06.1971; Оpubл. 05.11.1973. Бюл. № 45.
2. Александров, Е.В. Прикладная теория удара и расчета ударных систем / Е.В. Александров, В.Б. Соколинский. – М.: Наука, 1969.
3. Алесенко, В.М. Обоснование параметров и режимов работы роторного битера для разрушения картофельной грядки / В.М. Алесенко // Республик. Межвед. тематич. сб. / ЦНИИМЭСХ. – Минск: Урожай, 1968.
4. Андреев, В.И. Исследование динамических процессов ротационных почвообрабатывающих машин на примере фрез: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.И. Андреев. – М.: 1972.
5. Андреев, С.В. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава / С.В. Андреев и др. – М.: Металлургиздат, 1959.
6. Арутюнян, К.Г. К динамической теории клина, работающего в почвенной среде / К.Г. Арутюнян // Докл. МИИСП. – М.: 1966. №1.
7. Барабашкин, В.П. Молотковые роторные дробилки / В.П. Барабашкин. – М.: Недра, 1973.
8. Бахтин, П.У. Исследование физико-механических и технологических свойств основных типов почв СССР / П.У. Бахтин. – М.: Колос, 1969.
9. Бремер Г.И. Основы теории дробления и расчета дробильных машин в животноводстве / Г.И. Бремер. – Балашиха: Изд-во ВСХИЗО, 1959.
10. Василенко, П.М. Культиваторы / П.М. Василенко, П.Т. Бабий. – Киев: Изд-во Украинской сельхозакадемии, 1961.

11. Виноградов, В.И. Некоторые вопросы энергоемкости и качества работы ротационных плугов / В.И. Виноградов, В.Е. Рогоза // Материалы НТС ВИСХОМ. – М.: ВИСХОМ, Вып. 25, 1968.

12. Виноградов, В.И. Взаимодействие ротационных органов с почвой / В.И. Виноградов, Ю.С. Леонтьев // Тракторы и сельхозмашины. – 1968. - №9.

13. Виноградов, В.И. Энергоемкость резания почвенной стружки горизонтальными ножами ротационного плуга типа РП-190 / В.И. Виноградов, В.Е. Рогоза // Материалы НТС ВИСХОМ. – М.: ВИСХОМ, 1970. Вып. 27.

14. Веденяпин, Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г.В. Веденяпин. – М.: Колос, 1973.

15. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1989.

16. Ветров, Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю.А. Ветров. – М.: Машиностроение, 1971.

17. Высоцкий, А.А. Динамометрирование сельскохозяйственных машин / А.А. Высоцкий. – М.: Машиностроение, 1968.

18. Горячкин, В.П. Теория масс и скоростей сельскохозяйственных машин и орудий / В.П. Горячкин // Собр. соч.: В 3 т. – М.: Колос, 1965. Т.2.

19. Горячкин, В.П. Теория барабана / В.П. Горячкин // Собр. соч.: В 3 т. - М.: Колос, 1965. Т.3.

20. Гольдштейн, М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М.: Изд. литер. по строительству, 1971.

21. Гринчук, И.М. К вопросу выбора основных конструктивных параметров и режимов работы почвенной фрезы / И.М. Гринчук, Ю.И. Матяшин // Тракторы и сельхозмашины. – 1969. - № 1.

22. Гудков, А.Н. Теоретические основы вспашки твердых почв / А.Н. Гудков // Материалы НТС ВИСХОМ. – М.: ВИСХОМ, 1959, Вып. 5.

23. Деграф, Г.А. К определению предельных рабочих скоростей почвообрабатывающих машин / Г.А. Деграф // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1966. - №11.

24. Далин, А.Д. Ротационные грунтообрабатывающие и землеройные машины / А.Д. Далин, П.В. Павлов. – М.: Машгиз, 1950.

25. Егоров, Г.Г. Теория дробления и тонкого измельчения / Г.Г. Егоров. – М.-Л.: Главн. ред. горно-топливной и геолого-развед. лит-ры. 1938.

26. Жук, Я.М. О сопротивлении почвы различным деформациям / Я.М. Жук, В.Ф. Рубин / Почвообрабатывающие машины: Сб. науч. исслед. Работ Всесоюз. ин-т с.-х. маш-я. - М.-Л.: Гос. научн.-техн. изд. машиностроительной литер., 1940. - Вып. 3. – С.35-37.

27. Зенин, Л.С. Обоснование агротехнических требований на пропашную фрезу для поливной зоны / Л.С. Зенин // Материалы НТС ВИСХОМ. – М.: ВИСХОМ, 1968. - Вып. 25.

28. Игнатова, Е.Н. Исследование взаимодействия комбинированного рабочего органа плуга с почвой и обоснование некоторых его параметров: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.Н. Игнатова. – Челябинск: 1969.

29. Канев Н.Ф. Роторный (фрезерный) культиватор для каменистых почв с обратным направлением вращения / Н.Ф. Канев // Материалы НТС ВИСХОМ. – М.: ВИСХОМ, 1965. Вып. 20.

30. Кильчевский, Н.А. Теория соударения твердых тел / Н.А. Кильчевский. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949.

31. Канарев, Ф.М. Исследование критических режимов работы почвообрабатывающих фрез / Ф.М. Канарев, В.Б. Дендов, А.И. Ткаченко // Сб. научн. тр. Кубанского СХИ. – Краснодар: 1969. Вып. 29(57).

32. Киселев, С.Н. Обоснование параметров копателя для основной обработки почвы в теплицах: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Киселев С.Н.. – М.: МГАУ. 1995.

33. Киселев, С.Н. К определению энергетических показателей копателей / С.Н. Киселев // Тр. МИИСП. – М.: 1994.

34. Киселев, С.Н. Расчет почвообрабатывающих машин с активным приводом / Панов И.М., Киселев С.Н. – М.: МГАУ, 2000.
35. Крамаренко, Л.П. Сельскохозяйственные машины, теория, конструкция и расчет / Л.П. Крамаренко.– Харьков: ОНТИ, 1937. Т.1.
36. Космодемьянский, А.А. Курс теоретической механики / А.А. Космодемьянский. – М.: Просвещение, 1965. Ч.1.
37. Кильчевский, Н.А. Теория соударяющихся твердых тел / Н.А. Кильчевский. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949.
38. Кукибный, А.А. Метательные машины / А.А. Кукибный. – М.: Машиностроение, 1964.
39. Кацыгин, В.В. Исследование влияния повышенных рабочих скоростей почвообрабатывающих машин на крошение почвы и затраты энергии / В.В. Кацыгин // Вопросы земледельческой механики. – Минск: Урожай, 1961. Т.VII.
40. Леонтьев, Ю.С. Исследование работы ротационного плуга РП-190 в условиях Северного Зауралья: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю.С. Леонтьев. – Челябинск, 1969.
41. Лисунов, Е.А. Энергоемкость фрезерования почвы / Е.А. Лисунов // МЭССХ. – 1968, - №10.
42. Лойцянский, Л.Г. Курс теоретической механики / Л.Г. Лойцянский, А.Б. Лурье // В 2 т. – М.: Гос. изд. техн.-теорет. литер., 1955.
43. Матюшин, Ю.И. Расчет и проектирование ротационных почвообрабатывающих машин / Ю.И. Матюшин, И.М. Гринчук, Г.М. Егоров. – М.: Агропромиздат, 1988.
44. Мацепуро, М.Е. О коэффициенте полезного действия с.-х. машин / Мацепуро М.Е., Кацыгин В.В. // Вопросы земледельческой механики. – Минск: Гос. изд. с.-х. литер. БССР, 1961, Т.VII.
45. Медведев, В.И. Основы расчета и проектирования машинных агрегатов с рабочими органами – движителями: Автореф. дис. ... докт. техн. наук / В.И. Медведев. – Саратов: 1977.

46. Мацепуро, М.Е. К вопросу изучения разрушения сельскохозяйственных материалов ударом / М.Е. Мацепуро // Вопросы земледельческой механики. – Минск: Урожай, 1964. Т.ХІІІ.

47. Медведев, В.И. Энергетика машинных агрегатов с рабочими органами – движителями / В.И. Медведев. - Чебоксары: Чувашское книжное изд. с.-х. литер-ры, 1958.

48. Мельников, С.В. Теоретические основы технологии измельчения корма на молотковых дробилках / С.В. Мельников // Земледельческая механика: Сб. тр. – М.: Машиностроение, 1965. Т.ІV.

49. Мельников, С.В. Динамические режимы работы кормодробилок / С.В. Мельников // Записки ЛСХИ. - 1969. Т.143, вып. 1,2.

50. Мельников, С.В. Методика оценки качества размола концентрированных кормов / С.В. Мельников // Земледельческая механика: Сб. тр. – М.: Машиностроение, 1965. Т.V.

51. Нагорный, Н.Н. Энергетическая оценка почвообрабатывающих орудий / Н.Н. Нагорный, М.П. Белоткач // Тракторы и сельхозмашины. - 1980. - №7.

52. Новиков, Ю.Ф. О физической сущности некоторых явлений при вспашке / Ю.Ф. Новиков, А.И. Чебан, Л.П. Якушенко // Матер. НТС ВИСХОМ. – М.: ВИСХОМ, 1968. Вып. 25.

53. Новиков, Ю.Ф. Некоторые вопросы теории деформирования и разрушения пласта под воздействием двугранного клина / Ю.Ф. Новиков // Тр. ЧИМЭСХ. – Челябинск: 1969. Вып. 46

54. Офат, Е.А. Исследование элементов технологического процесса подбора солоmistых материалов / Е.А. Офат // Сб. тр. ВАСХНИЛ. – М.: Сельхозгиз, 1956. Т.6.

55. Панов, И.М. Энергобаланс машинно-тракторного агрегата с ротационной почвообрабатывающей машиной / И.М. Панов, В.А. Юзбашев // Тр. ВИСХОМ. - М.: ОНТИ ВИСХОМ, 1975. Вып. 85.

56. Панов И.М. Механико-технологические основы расчета и проектирования почвообрабатывающих машин с ротационными рабочими органами: Дис. ... докт техн. наук / И.М. Панов. – М.: 1983.

57. Панов, И.М. Силовые характеристики рабочих органов ротационных плугов / И.М. Панов, В.А. Юзбашев // Тракторы и сельхозмашины. - 1975.- №3.

58. Панов, И.М. Плуги с комбинированными рабочими органами / И.М. Панов, В.А. Шмонин // МЭССХ. - 1968. - №11.

59. Панов, И.М. Теория, конструкция и расчет ротационных почвообрабатывающих машин / И.М. Панов, Ж.Е. Токушев. – Кокшетау: Изд. Кокшетауского ун-та, 2005.

60. Панов, И.М. Снижение энергоемкости ротационных плугов / И.М. Панов, С.Н. Петров, В.В. Мелихов, В.А. Юзбашев // МЭССХ. - 1971. - № 1.

61. Павлов, П.В. Исследование сил в почвенных фрезях / П.В. Павлов // Сб. научн. тр. ВИМ. – М.: Сельхозгиз, 1952. - Т.15.

62. Подскребко, М.Д. К вопросу обоснования параметров активного рабочего органа комбинированного плуга / М.Д. Подскребко, П.И. Речкалов // Тр. ЧИМЭСХ. - 1969. Вып. 46.

63. Подскребко, М.Д. Влияние параметров и режимов работы комбинированного плуга на агротехнические показатели пахоты / М.Д. Подскребко, Е.Н. Игнатова // Матер. НТС ВИСХОМ. – М.: ВИСХОМ, 1970. Вып. 27.

64. Подскребко, М.Д. Повышение эффективности использования тракторных агрегатов на основной обработке почвы: Дис. ... докт. техн. наук / М.Д. Подскребко. – Челябинск: 1975.

65. Покровский, Г.И. Исследование по физике грунтов / Г.И. Покровский. – М.- Л.: Глав ред. строит. литер., 1937.

66. Попов Г.Ф. Исследование технологических режимов и обоснование конструктивных параметров рабочих органов пропашных культиваторов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г.Ф. Попов. – М.: 1970.

67. Полтавцев И.С. Фрезерные канавокопатели / И.С. Полтавцев. – Киев: Машгиз, 1954.

68. Размыслович, И.Р. Теоретические основы работы роторного рабочего органа плуга / И.Р. Размыслович, В.Я. Козловский // Научн. тр. по механизации с.-х. – Минск: Урожай, 1968.

69. Ребиндер, П.А. Физико-химические исследования процессов деформации твердого тела / П.А. Ребиндер. – М.: Машгиз, 1947.

70. Ревут, И.Б. Фрезерная обработка почвы и ее влияние на биологическую активность / И.Б. Ревут, Л.Д. Козлова. // Сб. тр. АФИ. – Л.: Колос, 1973.

71. Роторные дробилки: Исследование, конструирование, расчет и эксплуатация / Под ред. В.А. Баумана. – М.: Машиностроение, 1973.

72. Синеоков, Г.Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г.Н.Синеоков, И.М.Панов. – М.: «Машиностроение», 1977. – 328 с.

73. Саакян, Д.Н. Контроль качества механизированных работ в полеводстве / Д.Н. Саакян. – М.: Колос, 1973.

74. Сенин, М.Ф. Совмещение фрезерования почвы с посевом / М.Ф. Сенин. – М.: Изд. МСХА, 1991.

75. Свирщевский, Б.С. Эксплуатация машинно-тракторного парка Б.С. Свирщевский. – М.: Изд. с.-х. литер., 1958.

76. Соучек, Р. Определение показателей качества крошения почвы рабочими органами почвообрабатывающих машин / Р. Соучек, З. Аниш, Р. Бюшель // Межвузовский сб. РИСХМ. – Ростов-на-Дону, 1985.

77. Стародинский, Д.З. Пути снижения энергоемкости работы почвенных фрез / Д.З. Стародинский // Матер. НТС ВИСХОМ. – М.: ВИСХОМ, 1968. Вып. 25.

78. Суриков, В.С. Исследование энергоемкости работы и обоснование некоторых параметров фрезерного пропашного культиватора: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.С. Суриков. – М.: 1965.

79. Ткаченко, А.И. Энергоемкость фрезерования почвы в зависимости от формы рабочего органа / А.И. Ткаченко // Тр. Кубанского СХИ. – Краснодар: 1975. Вып. 103 (131).

80. Тома, Д. Машины для обработки почвы с ротационными рабочими органами / Д. Тома. // Доклад ООН. – Нью-Йорк: 1969.
81. Хоанг, Чиен Разрушение почвенных глыб ударом / Ч. Хоанг // МЭССХ. - 1968. - №10.
82. Чудаков, Д.А. Тяговая динамика и мощностной баланс тракторов с четырьмя ведущими колесами / Д.А. Чудаков // Сб. научн. тр. БИМСХ. – Минск: 1960. Вып. 2.
83. Цымбал, А. Комбинированный пахотный агрегат / А. Цымбал // Техника в сельском хозяйстве. - 1959. - №9.
84. Шаров, Н.М. Плуг с роликовым отвалом / Н.М. Шаров // Тракторы и сельхозмашины. - 1962. № 11.
85. Шмонин, В.А. Теоретические и экспериментальные исследования комбинированных плужных корпусов / В.А. Шмонин // Тр. ВИСХОМ. – М.: ВИСХОМ, 1972. Вып. 69.
86. Шишков, С. Определение основных параметров модели почвообрабатывающей фрезы / С. Шишков, Д. Даскалов, Н. Ковачев, Н. Тотев // Сельскостопанска техника. - 1973. - №3.
87. Юзбашев, В.А. Исследование работы ротационного плуга с целью снижения его энергоемкости: Дис. ... канд. техн. наук / В.А. Юзбашев. – М.: 1973.
88. Юзбашев, В.А. Влияние предварительного рыхления почвы на крутящий момент ротационного плуга / В.А. Юзбашев // Сб. тр. ВИСХОМ. - 1972. Вып. 70.
89. Яблонский. А.А. Курс теоретической механики / А.А. Яблонский // В 2 ч. – М.: Высшая школа, 1965. Ч. 2
90. Супов. З. Опыт разработки теории рабочего процесса туковой дробилки–дезинтегратора с одним вращающимся диском / З. Юсупов // Земледельческая механика. Сб. тр. – М.: Машиностроение, 1976. Т.ХІІІ.
91. Яцук, Е.П. Ротационные почвообрабатывающие машины. Конструкция, расчет, проектирование / Е.П. Яцук и др. – М.: Машиностроение, 1971.

92. Bernacki, H. Praca jednostkowa uprawowych maszyn kombinowanych / H. Bernacki // Builetyn Prac Naukowo Badawczych. – Warszawa: JMER, 1964. № 3.

93. Mirowski, Z. Plugofrezarki – Wyniki badan polowych / Z. Mirowski // Maszyny i ciagniki rolnicze. - 1966. - № 10, - R.13.

94. Bernacki, H. Teoria glebogryzarek / H. Bernacki // Builetyn Prac Naukowo Badawczych. – Warszawa: JMER, 1964. № 3.

95. Bernacki, H. Sily dynamiczne wpacy glebogryzarch / H. Bernacki // Builetyn Prac Naukowo Badawczych.– Warszawa: JMER, 1962. № 2.

96. Eggenmüller, A. Schellaufende Boden – Fräsen Langsam laufenden Rotorgrüber / A. Eggenmüller // Grundlagen der Landtechnik. - 1959. - № 11.

97. Eggenmüller A. Untersuchungen an einer Schar – Fräsen – kombinationen / A. Eggenmüller // Grundlagen der Landtechnik. - 1969. - № 11.

98. Sohne, W. Einfluss Form und Anordnung der Werkzlugen auf die Antriebsmomente von Ackerfäsen / W. Sohne // Grundlagen der Landtechnik. - 1957. - № 11.

99. Plow rotor // Canadian Farm Implement. - 1960. - № 9.

100. Frangizolle combinato ad azatro. // Machne e motori Agricole. - 1959. - № 2

101. Warboys, J.B. The development of the Wye double digger / J.B. Warboys // Agric. Eng. - 1988. V.43. № 1.

102. Eggenmüller, A. Quirpflug unterbesonderer Berücksichtigung des Aratore Civello / A. Eggenmüller // Grundlagen der Landtechnik. - 1959. - № 11.

103. Feurlein, W. Mischen und Zoxern / W. Feurlein // Grundlagen der Landtechnik. - 1959. - № 11.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| Глава 1. Краткий обзор конструкций комбинированных почвообрабатывающих машин | 6 |
| 1.1. Комбинированные лемешно-отвальные плуги | 6 |
| 1.2. Комбинированные фрезы и ротационные плуги | 28 |
| Глава 2. Основы динамики комбинированных почвообрабатывающих машин | 37 |
| 2.1. Методы снижения энергоемкости ротационной обработки почвы | 40 |
| 2.2. Ударное взаимодействие ротационных рабочих органов с почвой | 46 |
| 2.3. Сопротивление почвы при работе ротационных рабочих органов | 51 |
| 2.4. Силовые характеристики ротационных рабочих органов ... | 63 |
| 2.5. Баланс мощности МТА с комбинированной ротационной почвообрабатывающей машиной | 68 |
| 2.6. Коэффициент полезного действия МТА с комбинированной ротационной почвообрабатывающей машиной | 75 |
| Глава 3. Анализ силовых и энергетических показателей ротационных комбинированных почвообрабатывающих машин | 82 |
| 3.1. Лабораторные исследования | 82 |
| 3.2. Полевые исследования | 89 |
| 3.3. Анализ силовых характеристик ротационных и тяговых рабочих органов | 97 |
| Глава 4. Влияние различных факторов на энергоемкость МТА с ротационными комбинированными почвообрабатывающими машинами | 110 |
| 4.1. Влияние поступательной скорости | 111 |
| 4.2. Влияние окружной скорости барабана | 116 |
| 4.3. Влияние глубины ротационной обработки и глубины хода лап | 117 |
| 4.4. Влияние подачи | 120 |

ТЯГОВО-ПРИВОДНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ МАШИНЫ

| | |
|--|------------|
| 4.5. Влияние диаметра ножевого барабана | 130 |
| 4.6. Влияние ширины захвата машины | 132 |
| 4.7. Влияние степени крошения почвы | 134 |
| Глава 5. Основы теории комбинированных плужных корпусов ... | 151 |
| 5.1. Подрезание пласта и движение его по укороченному отвалу | 152 |
| 5.2. Уравнение движения ротора | 156 |
| 5.2.1. Абсолютные скорость и ускорение зуба | 156 |
| 5.2.2. Подача пласта на рабочий элемент ротора | 159 |
| 5.2.3. Число одновременно работающих зубьев | 161 |
| 5.2.4. Площадь и объем срезаемой стружки | 161 |
| 5.3. Крошение пласта ротором | 162 |
| 5.4. Отбрасывание почвы ротором комбинированного плужного корпуса | 176 |
| 5.4.1. Отбрасывание почвы зубовым ротором | 176 |
| 5.4.2. Отброс почвы ротором с лопатками | 182 |
| 5.5. Ширина и дальность рассеивания почвы | 187 |
| Глава 6. Динамика ротора комбинированного плужного корпуса . | 193 |
| Глава 7. Энергозатраты на обработку почвы плугами с комбинированными корпусами | 202 |
| 7.1. Силы, действующие на ротор | 202 |
| 7.2. Мощность необходимая для работы комбинированного корпуса | 203 |
| Глава 8. Результаты экспериментальных исследований плугов с комбинированными корпусами | 210 |
| 8.1. Лабораторные испытания | 210 |
| 8.2. Полевые испытания | 212 |
| 8.3. Описание и техническая характеристика разработанных машин | 230 |
| 8.4. Агротехническая эффективность комбинированных ротационных машин и плугов с комбинированными корпусами | 234 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 252 |
| ЛИТЕРАТУРА | 254 |
| ОГЛАВЛЕНИЕ | 263 |

Наукове видання

ВЕТОХІН Володимир Іванович, **ПАНОВ** Іван Михайлович,
ШМОНІН Володимир Олексійович, **ЮЗБАШЕВ** Валерій Андрійович

ТЯГОВО-ПРИВІДНІ КОМБІНОВАНІ ГРУНТООБРОБНІ МАШИНИ

ТЕОРІЯ, РОЗРАХУНОК, РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ

(російською мовою)

Монографія

Друкується в авторській редакції

Підписано до друку 03.03.09
Формат 60x84 1/16
Папір офсетний
Гарнітура Times New Roman
Ум. др. арк 15,345.Обл.-вид. арк. 12,08
Наклад 300 прим. Зам. № 9з-02

Віддруковано в друкарні „Видавництво „Фенікс”
03680 м. Київ, вул. Шутова, 13Б
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи ДК № 271 від 07.12.2000 р.
www.kniga.kiev.ua